

Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava

Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství



Analýza účinnosti nauhličovadel

Analysis of the Carburizers Efficiency

DIPLOMOVÁ PRÁCE
THESIS

AUTOR PRÁCE : Bc. MARTIN NEZGODA
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE : doc. Ing. JIŘÍ HAMPL, Ph.D.
SUPERVISOR

OSTRAVA 2018

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra metalurgie a slévárenství

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Martin Nezgoda**
Studijní program: N2109 Metalurgické inženýrství
Studijní obor: 2109T038 Moderní metalurgické technologie
Téma: **Analýza účinnosti nauhličovadel**
Analysis of the Carburizers Efficiency
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Stanovení cílů práce a postup řešení
2. Literární rozbor nauhličování litin
3. Rozbor technologie nauhličování LLG a LKG
4. Experimentální tavby pro ověření účinnosti nauhličování
5. Vyhodnocení odlitých vzorků litin
6. Vyhodnocení cílů práce
7. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] VONDRÁK, V., HAMPL, J., HANUS, A. *Metalurgie litin-mimopecní zpracování litiny*. VŠB-TU Ostrava, 2005.
- [2] NEUMANN, F. *Gusseisen, Renningen-Malmsheim, expert-verlag*. 1999, ISBN 3-8169-1728-3.
- [3] OTÁHAL, V. *Tvárná litina*, <http://otahalconsult.cz/ukazky-produktu/tvarna-litina/>.
- [4] Firemní materiály *RESORBENT*.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

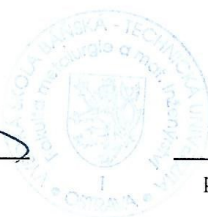
Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jiří Hampl, Ph.D.**

Datum zadání: 30.11.2017

Datum odevzdání: 23.04.2018



prof. Ing. Karel Michalek, CSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty

Zásady pro vypracování diplomové práce

I.

Diplomovou prací (dále jen DP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

II.

Uspořádání diplomové práce:

- | | |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list | 6. Obsah DP |
| 2. Originál zadání DP | 7. Textová část DP |
| 3. Zásady pro vypracování DP | 8. Seznam použité literatury |
| 4. Prohlášení + místopřísežné prohlášení | 9. Přílohy |
| 5. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky | |

ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry.

ad 2) Originál zadání DP student obdrží na své oborové katedře.

ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování diplomové práce“ následují za originálem zadání DP. („Zásady pro vypracování diplomové práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).

ad 4) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listu (ke stažení na webových stránkách fakulty) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání DP. V případě, že DP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnické nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním DP.

ad 5) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 6) Obsah DP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech očíslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části DP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 7) Textová část DP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním DP;
- Vlastní rozpracování DP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků DP z hlediska stanoveného zadání.

DP bude zpracována v rozsahu min. cca 45 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury).

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující **doporučené** úpravy - písmo Times New Roman 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 9).

Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. Matematické vzorce musí být číslovány (v kulatých závorkách). U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury. Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

- ad 8) DP bude obsahovat alespoň 15 literárních odkazů, z toho nejméně 5 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. **Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690.** Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu DP.

- ad 9) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

III.

Diplomovou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra

uprostřed: *DIPLOMOVÁ PRÁCE*

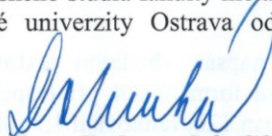
dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě. Po vložení DP do IS EDISON bude provedena její kontrola na plagiátorství.

IV.

Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování diplomové práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem magisterského, resp. navazujícího magisterského studia fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2017/2018.

Ostrava 13. 11. 2017


Prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty metalurgie a materiálového inženýrství
VŠB-TU Ostrava

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 - školní dílo);
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB - TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že odevzdáním své diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracoval(a) samostatně.

V Ostravě 23. 4. 2018

Martin Nový
.....
podpis (jméno a příjmení studenta)

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval mému vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Jiřímu Hamplovi Ph.D. za udělené rady, připomínky k diplomové práci a odborné vedení u taveb. Dále bych rád poděkoval paní Ivaně Malé za pomoc při přípravě jednotlivých vzorků a vyhodnocování výsledků. Nakonec bych rád poděkoval i panu Robinu Novotnému za provedení taveb a odbornou pomoc při přípravě vzorků.

ABSTRAKT

V experimentální části práce je uvedena metodika testování a analýza zkušebních taveb při testování jednotlivých typů nauhličovadel. Nauhličování se porovnávalo z hlediska rychlosti a kvality nauhličení. Cílem práce bylo určit, který typ nauhličovadla je nejvýhodnější z hlediska celkového času rozpouštění a využití uhlíku z nauhličovadla.

KLÍČOVÁ SLOVA

Nauhličování, litiny, mikrostruktura, grafit,

ABSTRACT

In the experimental part of the thesis there is presented the methodology of testing and analysis of test melts in testing of individual types of carburizers. Carbonization was compared in terms of speed and quality of carbonization. The aim of the work was to determine which type of carbohydrate is most advantageous in terms of the total time of dissolution and utilization of carbon from the carburizer.

KEYWORDS

Carbonization, cast iron, microstructure, graphite,

Obsah

Úvod	1
1 Litiny	2
2 Literární rozbor nauhličování litin.....	3
2.1 Grafit.....	3
2.2 Nukleace grafitu.....	3
2.3 Krystalizace eutektika.....	4
2.3.1 Vliv prvků na grafitizaci.....	4
2.3.2 Grafitizační schopnost	5
2.3.2.1 Červíkovitý grafit	5
2.3.2.2 Rozpadlý grafit.....	6
2.3.2.3 Lupínkový grafit.....	6
2.3.2.4 Chunky grafit.....	7
2.3.3 Další složky základní kovové hmoty.....	8
2.3.3.1 FERIT.....	8
2.3.3.2 PERLIT	8
2.3.3.3 CEMENTIT.....	8
2.3.4 Druhy matric.....	8
3 Rozbor technologie nauhličování LLG a LKG	9
3.1 Nauhličování taveniny LLG a LKG	9
3.2 Nauhličovadla	10
3.2.1 Plněný profil	10
3.2.2 Odsířený koks	10
3.2.3 Antracit	11
3.2.4 Kalcinovaný antracit.....	12
3.2.5 Peletizované aktivní uhlí	13
3.2.6 Kalcinovaný petrolejový koks	14

3.2.7	Grafitizovaný petrol koks	14
4	Experimentální tavby pro ověření účinnosti nahličování	16
4.1	Vsázkový materiál	16
4.2	Příprava forem a přístrojů pro tavby	17
4.3	Průběh taveb	20
4.3.1	I. série taveb.....	21
4.3.1.1	DESULCO (99,7).....	21
4.3.1.2	R-CARBON-NOD DLS (99,1)	22
4.3.1.3	R-CARBON LS (98,5).....	23
4.3.1.4	R-CARBON PELETS (98,0)	24
4.3.1.5	R-CARBON NOD DKA(97,5)	25
4.3.1.6	R-CARBON (97,5).....	26
4.3.1.7	KA 01 (95,1)	27
4.3.2	II. série taveb	28
5	Vyhodnocení odlitých vzorků litin.....	30
5.1	Zákalková zkouška	30
5.2	Vyhodnocení mikrostruktury	32
5.2.1	DESULCO.....	33
5.2.2	R-CARBON DLS	33
5.2.3	R-CARBON LS.....	33
5.2.4	CARBON PELETS - LLG	34
5.2.5	R-CARBON DKA.....	34
5.2.6	CARBON 97- LLG	34
5.2.7	KA 01	35
5.3	Chemická analýza	36
	Vyhodnocení cílů práce	38
	Závěr.....	41

Použité zdroje	42
Použité literární zdroje.....	43
Použitý seznam obrázků	44
Použité tabulky	45
Použité grafy.....	46

Úvod

Cílem práce je porovnání účinnosti různých typů nauhličovadel. Porovnávalo se sedm typů nauhličovadel s různým obsahem uhlíku, z hlediska využití uhlíku a rychlosti nauhličování vsázky tvořené ocelí s nízkým obsahem uhlíku.

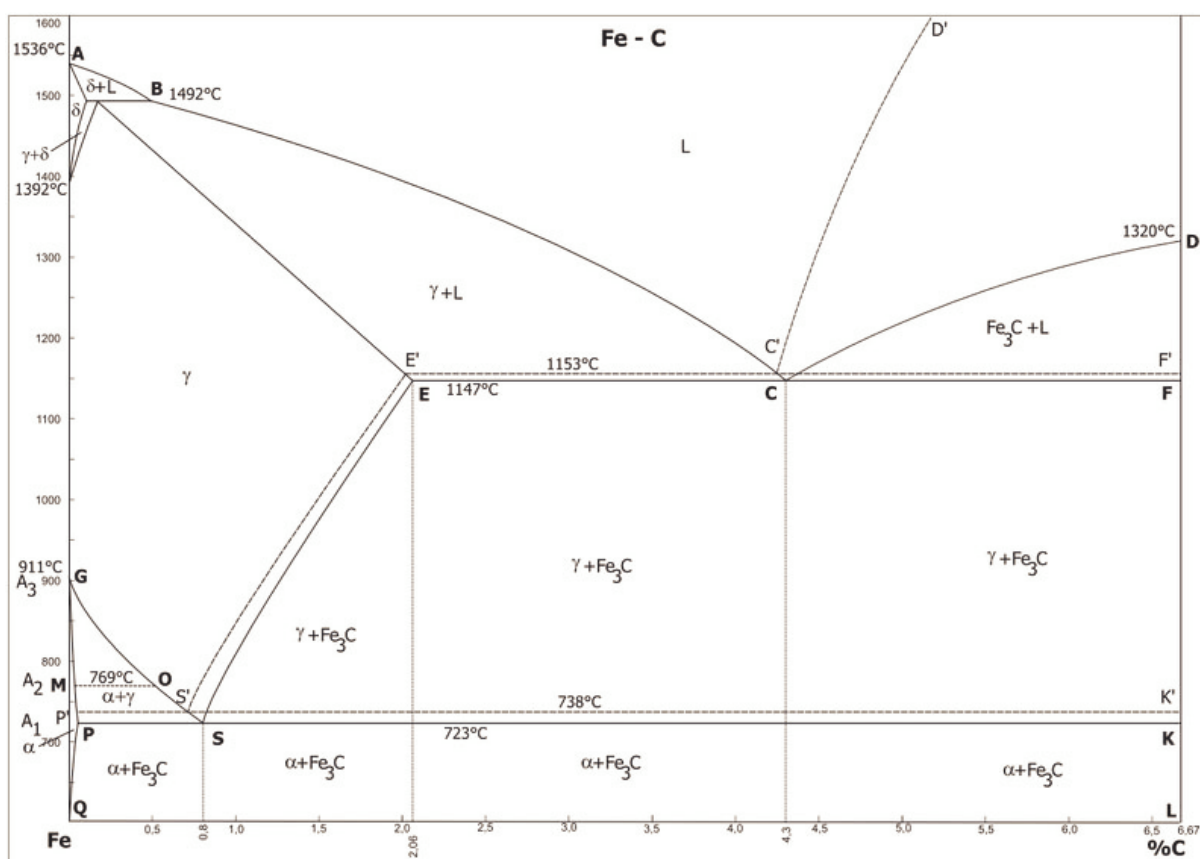
Teoretická část práce je zaměřena na popis technologií nauhličování tzv. syntetických litin. V experimentální části práce je uvedena metodika testování a analýza zkušebních taveb při testování jednotlivých typů nauhličovadel. Nauhličování se porovnávalo z hlediska rychlosti a kvality nauhličení. Cílem práce bylo určit, který typ nauhličovadla je nejvýhodnější z hlediska celkového času rozpouštění a využití uhlíku z nauhličovadla.

1 Litiny

Litiny se dělí podle tvaru vyloučeného grafitu. Uhlík má na tyto slitiny významný vliv a nejvýznamnějším způsobem ovlivňuje jejich důležité vlastnosti. Železo s uhlíkem vytváří intersticiální tuhé roztoky s omezenou rozpustností uhlíku. Uhlík se vyloučí jako samostatná fáze tehdy, když dojde k překročení jeho rozpustnosti v tuhém roztoku. Nízký obsah uhlíku může způsobit, že se intersticiální sloučenina Fe_3C , zvaná jako karbid železa, rozloží na železo a grafít.

Existují dva druhy soustav, v jaké může být uhlík vyloučen. Může se vylučovat buďto, jako stabilní Fe-C, podle které chladnou a tuhnou grafitické litiny nebo metastabilní Fe- Fe_3C , podle které chladnou a tuhnou zejména oceli, ale také i bílé litiny.

Podle stabilních a metastabilních rovnovážných binárních diagramů můžeme odvodit vlastnosti a strukturu slitin. Stabilní diagram je uveden na obr.1. [14,7,6]



Obr. 1 Stabilní diagram Fe-C

2 Literární rozbor nauhličování litin

2.1 Grafit

V litině s kuličkovým grafitem, by měl být grafit vyloučen jako kuličkový a rovnoměrně rozložený. Ve struktuře se toleruje malé množství nedokonale zrnitého grafitu obvykle do 5%. Hodnotí se také hrubost grafitu neboli disperzita grafitu, neboli počet kuliček na mm^2 . U běžných odlitků by měla být aspoň 100-150 kuliček/ mm^2 , někdy může dosahovat 400-600 kuliček/ mm^2 . Litiny s grafitem příliš jemně vyloučeným však mají horší technologické vlastnosti, zejména se zvětšuje rozsah pórovitosti a mikrostaženin v odlitku. U silnostěnných odlitků je disperzita grafitu menší. Velké částice znamenají nedokonalé tvoření kulovitěho tvaru. Mezi jednotlivými kuličkami grafitu můžou segregovat prvky a na hranicích zrn mohou vznikat karbidy. [2,13]

2.2 Nukleace grafitu

Nukleace grafitu je důležitá pro výsledné vlastnosti litiny. Velice důležitým úkolem je zajistit, aby se grafit vyloučil rovnoměrně v celém průřezu odlitku a ve vzájemně si podobných útvarech a to jak velikostí, tak tvarem. Při nevyhovujících podmínkách, při tuhnutí, může docházet k vylučování grafitu s nevhodným rozložením a také k vyloučení primárního, eutektického cementitu. Tento cementit působí nepříznivě na obrobiteľnost, mechanické vlastnosti a především zvyšuje tvrdost litiny. [5]

Jedny z nejdůležitějších forem prvků, které mají velký vliv na vznik zárodku grafitu v litině s lupínkovým grafitem jsou sulfidy, oxidy a karbidy prvků, které jsou přítomny v litině. Tyto sloučeniny musí splňovat určité podmínky, aby fungovaly jako zárodky. Tyto podmínky jsou:

- V tavenině se nesmí rozpouštět a musí být v pevném stavu při překročení solidu.
- Další podmínkou je, aby byly dostatečně malé, neshlukovali se a nevyplovávaly na hladinu.
- Velice důležité je rovnoměrné rozložení v tavenině, a podpora růstu jen jedné fáze.

Oxidy a sulfidy popřípadě jejich komplexy jsou termodynamicky stabilní, zatímco karbidy jsou stabilní nejméně. Velikost zárodků by neměla být větší než $1\mu\text{m}$. Čtvrtý bod bude splněn jen tehdy, pokud je parametr mřížky zárodků podobný rostoucímu parametru fáze rozdíl by neměl být nad 5%. [5]

V litině s lupínkovým grafitem se nacházejí sulfidické zárodky, tyto zárodky jsou založeny na sloučeninách síry a manganu. Při použití velmi čistého vsázkového materiálu při tavení v elektrických indukčních pecích, nebo elektrických obloukových pecích, může dojít u litiny k tzv. snížené schopnosti tuhnutí dle stabilního diagramu. Síra je totiž povrchově aktivním prvkem a tudíž snižuje povrchové napětí mezi taveninou a vylučujícím se grafitem. Z toho plyne, že minimální obsah síry okolo 0,04% vede k zvýšení počtu grafitizačních zárodků a tudíž menším energetickým nárokům na tvorbu grafitu. [5,1]

V litinách vznikají oxidy reakcí kyslíku a křemíku, popřípadě dalších stopových prvků s větší afinitou. Množství vyloučených oxidů je úzce spjato s obsahem rozpuštěného kyslíku. Obsah rozpuštěného kyslíku je závislý jak na způsobu tavení, tak i na přehřátí kovu. Jelikož v kuplovnách je tavenina v přímém kontaktu s kyslíkem má nově vznikající kov v sobě rozpuštěno více kyslíku. Díky tomuto mají litiny z kuploven menší sklon k zákalce. Při přehřátí na teplotu, při které probíhá redukce křemíku uhlíkem, neboli také když dochází k uhlíkovému varu, dochází k redukci SiO_2 a tím i k nechtěnému snížení zárodků. Z toho plyne, že pro dobrou grafitizaci není vhodné toto přehřátí. SiO_2 zárodky rostou na oxidech jiných kovů s vyšší afinitou ke kyslíku a zároveň vyšší teplotou tavení. Jsou to Al, Zr, Sr, Ca, Ba. Jedná se tedy o tzv. heterogenním vzniku zárodků.[5,1]

2.3 Krystalizace eutektika

Krystalizace dvoufázového eutektika začíná tehdy, když vzniknou krystaly vedoucí fáze, na kterých rostou následující fáze, přičemž vedoucí fáze vyžaduje pro vznik menší přechlazení. Jednotlivé eutektika se dělí podle schopnosti vedoucí fáze, zjednodušit krystalizaci druhé fáze. Dělí se na normální eutektika a anomální eutektika. Normální eutektikum vzniká tehdy, když vedoucí fáze pomůže fázi druhé krystalizovat za stejného přechlazení, jaké je vyžadováno pro krystalizaci vedoucí fáze. Takto vzniklé eutektikum je mnohdy lamelární a primární a sekundární fáze se pravidelně střídají. Anomální eutektikum se vyskytuje u fází, které mají velmi odlišnou krystalickou mřížku. Obě fáze rostou nezávisle a také nejsou nijak vzájemně orientovány. Vedoucí fáze nezlehčuje krystalizace fáze druhé. Typické pro toto eutektikum jsou litiny s nízkým podchlazením, u kterých je vedoucí fází grafit. [5]

2.3.1 Vliv prvků na grafitizaci

Podle účinku grafitizace při tuhnutí eutektika se prvky dělí na grafitizační do kterých, patří (Si, Al, Ni, Ti, Cu, C, P) dále antigrafitizační (V, Cr, Mg, Ce, B, S) a nakonec neutrální

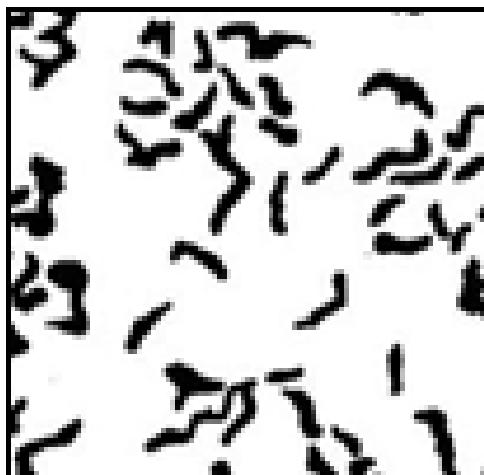
(Mn, Zn, Co). Jedním s nejdůležitějších grafitizačních prvků je křemík. Grafitizační prvky podporují tuhnutí podle stabilního systému a vylučování uhlíku v podobě grafitického eutektika. Antigrafitizační prvky podporují vznik metastabilního eutektika, kterým je ledeburit. Velice důležitým antigrafitizačním prvkem nacházejících se v litinách je chrom a v litině s kuličkovým grafitem působí antigrafitizačně i hořčík. Jedním z velice důležitých feritotvorných prvků je křemík, který způsobuje změny jak v eutektoidní transformaci, tak i v oblasti tuhnutí. [1,2]

2.3.2 Grafitizační schopnost

Grafitizační schopnost litiny je velice ovlivněna chemickým složením taveniny. Základními grafitotvornými prvky jsou uhlík a křemík. Při vhodném obsahu těchto dvou prvků a vlivem i jiných činitelů litina tuhne podle stabilního systému. V litině s kuličkovým grafitem se grafit, díky vhodnému modifikování vyskytuje ve formě kuliček a to více či méně pravidelných. Ovšem velikost a celkové rozložení grafitu záleží na způsobu a účinnosti očkování. Odchyly od kulatého tvaru vyjadřuje pojem nodularita. Nodularita je rovná jedné je-li částice ideálně kulatá. Způsob rozložení grafitu, ale i nodularita v matrici mají zásadní vliv na výsledné vlastnosti litin. Nežádoucí odchyly od ideálního stavu jsou červíkovitý grafit, rozpadlý grafit, lupínkový grafit a chunky grafit.[3,1]

2.3.2.1 Červíkovitý grafit

Červíkovitý neboli vermikulární grafit je na obr. 2, vzniká vlivem nedostačující modifikace, což znamená nízký obsah zbytkového hořčíku v tavenině, popřípadě nízký obsah hořčíku v modifikátoru. Další příčiny vzniku červíkovitého grafitu může být nízký obsah kovů vzácných zemin, vysoká teplota kovu, vysoký obsah síry nebo dlouhá doba odeznívání.[3,2,9]



Obr. 2 Červíkovitý grafit

2.3.2.2 Rozpadlý grafit

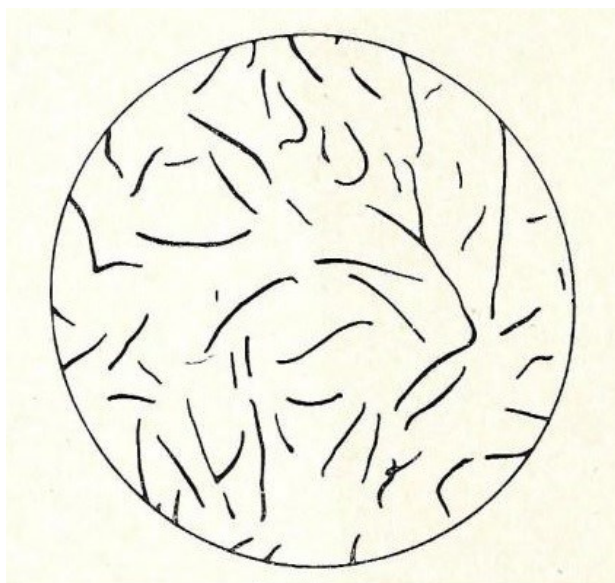
Rozpadlý neboli explodovaný grafit obr. 3, vzniká při nesprávné volbě obsahu uhlíku a křemíku, nebo také ekvivalentu Ce, který přesáhne 4,5%, a tehdy dochází k fluktači kuliček grafitu neboli roztržení. Jedním z dalších důvodů může být i nadměrná modifikace litiny při vysokém obsahu hořčíku. K rozpadnutí grafitu také dochází vlivem nadměrného očkování, které je provedeno za nízké teploty. Přeočkováná litina může obsahovat nadměrné množství prvku kovů vzácných zemin nad cca 0,02% a vlivem příliš dlouhé doby tuhnutí dochází k postupnému rozpadu kuliček grafitu.[1,2,9]



Obr. 3 Explodovaný grafit

2.3.2.3 Lupínkový grafit

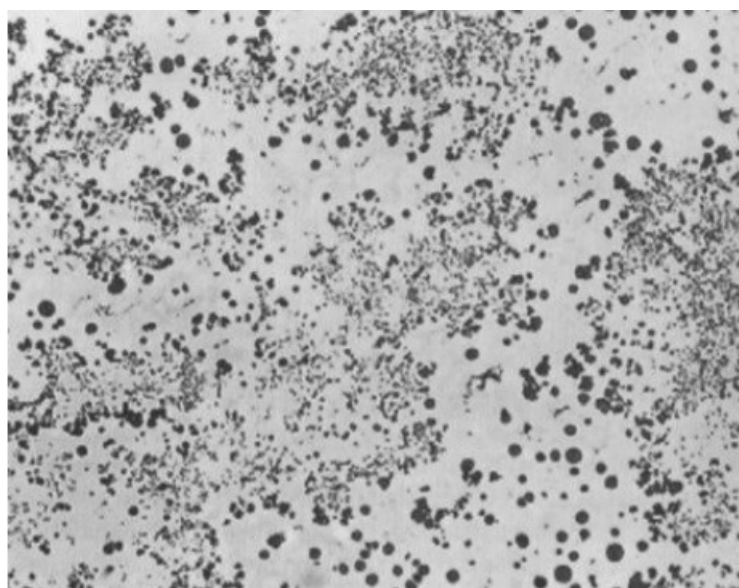
Lupínkový grafit obr. 4, obsahuje grafit ve tvaru prostých útvarů, které na metalografických výbrusech mají tvar lupínků. Délka lupínků je větší než jejich tloušťka a konec lupínků je ostrý. Čím ostrohranější je zakončení grafitu, tím je také větší vrubový účinek. Z tohoto hlediska je lupínkový grafit nejméně vhodný, ale i přes tyto vady je litina s lupínkovým grafitem neboli také šedá litina, nejobvyklejším typem vyráběných litin. [1,9]



Obr. 4 Lupínkový grafit

2.3.2.4 *Chunky grafit*

Chunky grafit na obr. 5, tvoří se přímo uprostřed buněk. Vzniká tehdy, jestliže má litina příliš velké množství kovů vzácných zemin, křemíku nebo niklu. K vytvoření chunky grafitu může také jako u rozpadlého grafitu vlivem vysokého uhlíkového ekvivalentu Ce, nebo dokonce tehdy jsou-li vsázkové suroviny příliš čisté.[1,7]



Obr. 5 Chunky grafit

2.3.3 Další složky základní kovové hmoty

2.3.3.1 *FERIT*

Vzniká při eutektoidní transformaci austenitu podle stabilního diagramu.

Mechanické vlastnosti feritu: měkký, tvárný, má relativně nízkou pevnost, dobře obrobitelný.

2.3.3.2 *PERLIT*

Eutektoid vzniklý rozpadem austenitu podle metastabilního systému. Je tvořen feritem a perlitickým cementitem, který mu dodává větší pevnost a tvrdost, než má ferit.

2.3.3.3 *CEMENTIT*

U nelegovaných litin je tvořen karbidem železa Fe_3C se 6,67 %C. Za přítomnosti legur (např. Mn, Cr, W, V, Mo) mohou být atomy Fe nahrazovány atomy těchto prvků za vzniku komplexních karpidů typu $(\text{Fe},\text{X})_3\text{C}$.

Druhy cementitu v litinách:

- primární - vyskytuje se v nadeutektických bílých litinách ve tvaru hrubých jehlic.
- eutektický - součást metastabilního eutektika - ledeburitu. Způsobuje velkou tvrdost, křehkost a neobrobitelnost bílé litiny.
- perlitický - součástí eutektoidu - perlitu. Zvyšuje pevnostní a snižuje plastické vlastnosti litiny.

2.3.4 Druhy matic

Feritická matrice vzniká při nízké ochlazovací rychlosti a při zvýšeném množství křemíku. Ve většině případů je však vyžadována vyšší pevnost a tvrdost a toho lze dosáhnout, pokud je matrice perlitická.

Perlitická matrice vzniká při vyšší ochlazovací rychlosti a podporují ji rovněž malá množství prvků, jako jsou Cu, Cr, Mo, Ni, Sn. [5,11,12]

3 Rozbor technologie nauhličování LLG a LKG

3.1 Nauhličování taveniny LLG a LKG

Při výrobě tvárné a šedé litiny se stále víc začínají používat takzvané syntetické taveniny. Základem vsázkového materiálu je kovový šrot, který se taví v elektrických pecích. Obsah uhlíku v tavenině musí být přísně korigován, a to buďto přidáváním surového železa nebo pomocí nauhličování prostřednictvím grafitu, nebo i popřípadě i pomocí kalcinovaného petrolejového koksu. Tato úprava chemického složení je usnadněna intenzivním pohybem taveniny, která také zajišťuje homogenizaci lázně. Velice důležitým faktorem je také rychlost rozpouštění uhlíku v tavenině, která je závislá především na obsahu popela v přípravcích a také teplotě lázně. Se zvyšující se teplotou kovu se nauhličování urychluje, a je možno dosáhnout celkově vyššího obsahu uhlíku. Naopak čím vyšší je obsah popela v nauhličovadle, tím pomalejší je rozpouštění uhlíku a vzniká zároveň větší množství strusky. Rychlost nauhličování je ovlivněna i samotným obsahem křemíku, neboť při vysokém obsahu křemíku jsou nauhličovadla méně účinné. Proto se vsázka většinou první nauhličuje a až pak se dolegovává obsah křemíku. Na trhu jsou nabízeny různé druhy nauhličovadel v různých cenových a kvalitativních kategoriích. Cena a kvalita je závislá na různých faktorech například obsahu popele (0,10 až 2,7%), obsahu síry (0,1-2%), obsahu dusíku (0,1-9000 ppm), a obsahu uhlíku (75-99%).[9,2,1]



Obr. 6 Příklad nauhličování na hladinu použité v experimentu

3.2 Nauhličovadla

Nauhličování je rozpouštění tuhého uhlíku, který může být v různých formách. Konečným stupněm nauhličení taveniny z vsázky je výsledkem působení dvou současně probíhajících pochodů, a to nauhličení a zároveň oduhličení. Na tyto pochody má vliv celá řada činitelů, jedním z nich je chemické složení vsázky (obsah uhlíku a ostatních prvků jako Si, Mn, P). Dále to může být skladba vsázky (podíl ocelového odpadu), a další.



Obr. 7 Příklady nauhličovadel použitých v experimentální části

Nauhličovadla obr. 7 jsou používány k hrubému nauhličení při tavení oceli, dále se mohou používat jako suroviny pro jemné nauhličení při mimopecním zpracování, také pro napěnění strusky při tavení oceli v elektrické obloukové peci. [2,10,16]

3.2.1 Plněný profil

Plněný profil se používá jako injektáž modifikujícího materiálu do roztavené litiny. Plněný profil je dutý drát o tloušťce cca 0,3 mm plněný konkrétním modifikátorem dle zvoleného typu plněného profilu. Metodu plněných profilů lze použít pro všechny druhy litin s kuličkovým grafitem-LKG. [4]

3.2.2 Odsířený koks

DESULCO obr. 8 neboli odsířený koks byl vyvinut pro vysoké nároky v moderní metalurgii. Tento produkt dosahuje čistoty až 99,9 % uhlíku. Neobsahuje žádný prach, jen malé množství popela a zajišťuje i trvale nízkou hladinu plynů. Výsledkem této kvality je maximální využití uhlíku s minimálními nároky na dobu rozpouštění. Produkt DESULCO plní ty nejprísnejší kritéria, která jsou stanovená pro nauhličování tvárných litin a zároveň

díky extrémnímu nízkému obsahu plynů je tento materiál i preferovaný pro pozdější úpravu šedé litiny, stejně tak i v ocelárnách kde vyrábějí vysoce kvalitní uhlíkovou ocel. [8]

Desulco 9005 je od firmy Superior Graphite, která pochází ze Spojených států amerických a je lídrem ve výrobě nauhličovadel. Tato firma je prodejcem nauhličovadel pod značkou DESULCO pro trh ve střední a jihovýchodní Evropě. [4]



Obr. 8 DESULCO 9005 použité v experimentu

3.2.3 Antracit

Antracit obr. 9 je druh uhlí, který disponuje vysokým obsahem uhlíku 90 – 96% a zároveň i malým obsahem prachových látek a velkou výhřevností. Antracit je tvrdý, kompaktní druh minerálního uhlí, který má ocelově šedou až černou barvu a téměř kovový lesk. Má nejvyšší výhřevnost ze všech typů uhlí a zároveň nejvyšší obsah uhlíku s nemenším obsahem nečistot.

Spalováním antracitu je považováno za nejčistší ze všech druhů uhlí. Antracit produkuje méně kouře a produkuje více tepla než jiné uhlí.

Používá se především při výrobě oceli. Má využití v oblasti metalurgie, jako například vstupní surovina pro kalcinaci a tudíž výrobu nauhličovadel. [4]



Obr. 9 Antracit

3.2.4 Kalcinovaný antracit

Resorbent KA 01 obr. 10, neboli také kalcinovaný antracit je tepelně zpracovaný surový antracit vyrobený vysokoteplotní úpravou zvanou kalcinace. Kalcinací se nazývá proces úpravy vstupní suroviny za použití vysokých teplot v tzv. kalcinačních elektrických nebo plynových pecích.

Výroba plynem kalcinovaného antracitu spočívá v žíhání v horizontální plynové peci při teplotě okolo 1280°C. Tento kalcinovaný antracit (GCA) se vyrábí z antracitového uhlí, které je také známé svým velice nízkým obsahem popela, prachových látek a především síry.

Resorbent KA 01 je často využíváno v ocelářských a pánvových pecích jako nahličovadlo, také je využíváno při výrobě uhlíkových bloků a přechovací pasty. Dále se používá jako náhrada kalcinovaného ropného koksu při konkrétní aplikaci pro výrobu šedé a tvárné litiny. [4]



Obr. 10 Resorbent KA 01 použité v experimentu

3.2.5 Peletizované aktivní uhlí

Carbon pellets obr. 11, neboli peletizované aktivní uhlí (peletky) se vyrábí o průměrech 1 - 4 mm, přičemž tvar se volí s ohledem na aplikaci, dobu zdržení a tlakovou ztrátu při průchodu filtrem.

Peletizované aktivní uhlí může být umístěno ve stacionárních filtrech, absorpčních patronách, krabicových filtrech s nuceným průchodem média. [4]



Obr. 11 Resorbent Carbon pellets použité při experimentu

3.2.6 Kalcinovaný petrolejový koks

Kalcinovaný petrolejový koks obr. 12 je látka s vysokým obsahem uhlíku, vyráběná za vysokých teplot z těžkých ropných frakcí. Je také mnohdy označován jako zelený koks (nezpracovaný). Zpracováním zeleného koksu kalcinací v rotační peci se z koksu odstraní těkavé uhlovodíky. Dále se kalcinovaný ropný koks může zpracovávat v anodové peci za účelem výroby anodového koksu, který bude mít požadovaný tvar a fyzikální vlastnosti. [4]

Kalcinovaný petrolejový neboli také ropný koks (CPC) je produktem koksovací jednotky ropné rafinerie. Tento kalcinovaný ropný koks se používá k výrobě anod pro výrobu hliníku, oceli a titanu v hutním průmyslu. Dále se tento koks používá zejména při výrobě grafitových elektrod a v neposlední řadě, má využití i ve slévárnách a ocelárnách jako nauhličovadlo. Obsah fixního uhlíku v kalcinované formě ropného koksu se pohybuje okolo 97 - 99,5 %.[4]



Obr. 12 Resorbent R - Carbon NOD DLS vlevo a Resorbent R – Carbon NOD DKA vpravo oba použité při experimentu

3.2.7 Grafitizovaný petrol koks

Grafitizovaný petrol koks obr. 13, neboli také grafit vzniká grafitizací kvalitního ropného koksu za vysokých teplot, které dosahují přes 2300°C. Má méně nečistot, nízký obsah síry, vysoký obsah uhlíku a velice snadno se absorbuje.

Používá se jako nauhlčovadlo a je široce používán ve zvláštním licím procesu, zejména pro splnění požadavků vysoké kvality výrobků a přesnou kontrolu obsahu síry u šedé a tvárné litiny a jiných aplikací. [4,11]



Obr. 13 Resorbent Carbon 97 použitý při experimentu

4 Experimentální tavby pro ověření účinnosti nauhličování

Nauhličování se testovalo 3 způsoby aplikace - v závislosti na režimu nauhličování:

Nauhličování 1,7 % N = 340g na 20kg společně s tuhou vsázkou. Při roztavování vsázky se měřil čas jejího úplného roztavení i společně s N.

Nauhličování stejným dílem 1,7 % (340g) N přidaného na hladinu roztavené a předchozím podílem částečně nauhličené (1,7%) vsázky. Měřil se čas potřebný k úplnému rozpuštění nově přidaného podílu 1,7 % (celkem 3,4% (340g+340g=680g)).

Po roztavení vsázky s výchozím obsahem uhlíku (tab. 12 vzorky 1A-7A) se na hladinu roztavené litiny přidala standardní dávka 0,4 % N - a měřil se čas úplného rozpuštění. Současně se vizuálně hodnotil výskyt strusky.

Čistý vsazený uhlík se vypočítal z přidaného množství N x procentuální obsah uhlíku dle typu N (tab. 1). Křemík byl dodán do litiny vždy až po dokončeném nauhličení.

Využití uhlíku z vsazeného N (η_C) se stanovilo dle (1).

$$\eta_C = \frac{C_{\text{konečný}}}{C_{\text{výchozí}} + C_{\text{vsazený}}} \cdot 100 (\%) \quad (1)$$

Příprava forem pro zkušební odlitky, samotné tavení, měření a vyhodnocování křivek chladnutí byly provedeny v laboratořích VŠB-TU Ostrava. V dalších laboratořích VŠB-TU byly provedeny i veškeré další operace, jako vyhodnocení mikrostruktury, mechanické zkoušky a chemická analýza.

4.1 Vsázkový materiál

Vsázkový materiál pro první sérii taveb (obr. 14) tvořila ocel chemického složení (tab. 1) a hmotnosti 20 kg na jednu tavbu.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Cu	Ni
0,42	0,30	0,82	0,015	0,012	0,96	0,20	0,018	0,072

Tab. 1 Výchozí chemické složení oceli (%) pro nauhličování.

Nauhličené ocel (litina) nebyla při odlévání očkována, důvodem bylo to, aby test nauhličení nebyl očkováním ani jinými zásahy nějak ovlivněn. Před každou zkouškou

nauhličování byl kelímek EIP předehřátý výplachovou tavbou, tak aby byly dodrženy stejné výchozí teplotní podmínky při následujících zkušebních tavních.



Obr. 14 Vsázkový materiál

4.2 Příprava forem a přístrojů pro tavní

Celkem se zhotovilo pro obě série taveb 6 forem pro zkušební tyče (obr. 15) a 14 forem pro zákalkovou zkoušku (obr. 16). Také se odlévaly vzorky pro termickou analýzu (obr. 18) a chemickou analýzu (obr. 17). Zaznamenané křivky ochlazování při tavních byly vyhodnocovány přístrojem Quik-Lab-E thermal analyser od firmy Heraeus Electro-nite.



Obr. 15 Forma pro zkušební tyče

Forma pro zkušební tyče byla vyrobena z bentonitové směsi.



Obr. 16 Formy pro zákalkové zkoušky

Zákalková zkouška (obr. 16) ukazuje výšku zákalky.



Obr. 17 Kovové formy pro odlitky stanovující chemickou analýzu

Kovové kokily (obr. 17) pro kvantometrickou analýzu.



Obr. 18 Stojan s kelímkem pro termickou analýzu

Termická analýza pro hodnocení průběhu grafitizace je založena na vyhodnocování teplot a tvaru křivky chladnutí v oblasti tuhnutí eutektika. Z křivek chladnutí se přesně stanovoval obsah uhlíku a orientačně také obsah křemíku.

Tavení se uskutečnilo v laboratořích VŠB-TU Ostrava. K tavení a nauhličení taveniny byla využita středofrekvenční elektrická indukční pec (Obr.) o obsahu 30kg. Konstantní výkon EIP byl nastaven na 24,5 KW, pro stálou udržovací teplotu $t = 1450\text{ }^{\circ}\text{C}$, měřenou ponornou sondou s termočlánkem (TSO-Termosondy Kladno). Nauhličená ocel (tj. litina) se z EIP vylévala do předeřáté pánve a následně odlévala do připravených forem.



Obr. 19 Středofrekvenční elektrická indukční pec

4.3 Průběh taveb

Celkem se testovalo 7 typů nahličovadel (tab.)

Tab. 2 Typy testovaných nahličovadel

	Typ N	C min.	S max.	A max.	W max.	N max.	V max.
1.	DESULCO	99,7	0,30	0,3	0,2	0,018	-
2.	R-CARBON DLS	99,1	0,05	0,5	0,4	0,28	0,40
3.	R-CARBON LS	98,5	0,10	0,8	0,5	0,55	1,00
4.	CARBON PELETS-LLG	98,0	0,90	1,0	0,2	2,00	1,00
5.	R-CARBON DKA	97,5	0,11	2,5	0,35	0,28	0,32
6.	CARBON 97-LLG	97,5	1,40	0,6	0,2	0,50	0,50
7.	KA 01	95,1	0,18	4,5	0,5	0,55	0,65

Pozn. C-Uhlík. S-síra. A-popel. W-voda. N-Dusík. V-prachové látky

4.3.1 I. série taveb

Pro první sérii taveb byla použita ocel chemického složení (tab. 1).

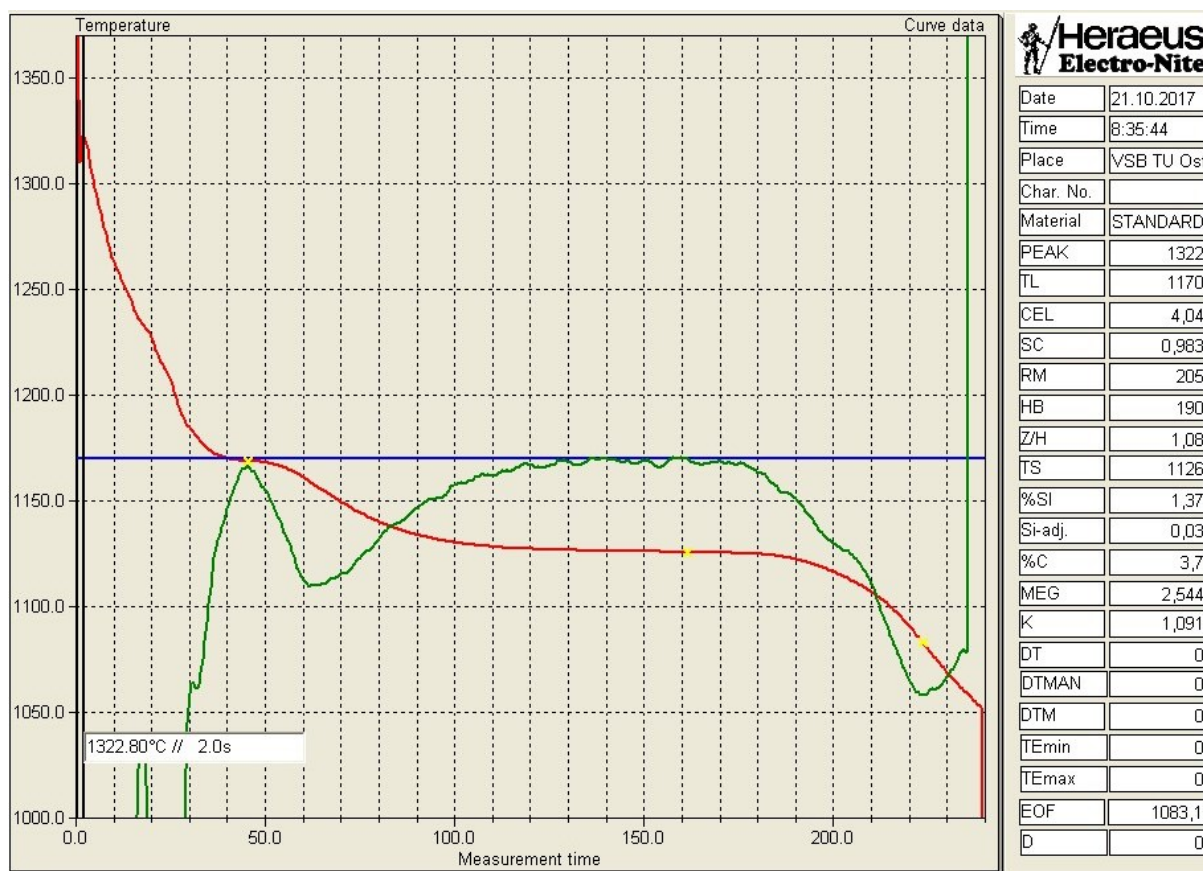
4.3.1.1 DESULCO (99,7)

Pro první tavbu bylo použito nahličovadlo DESULCO chemického složení (tab. 2).

Tab. 3 Tavba 1 Desulco (99,7)

VSÁZ.	C			Si	CE	Sc	TL	Ts	TvÝCH.	Tkon.	t
	TA	LEC	SPE	SPE							
TUH.			0,42						1450	1450	25,0
TEK.	3,53	3,49	3,54	1,95	3,91	0,98	1184	1123	1450	1490	16,5

Pozn. TA-termická analýza. LEC- spalovací metoda LECO. SPE-spektrální analýza. CE ekvivalentní uhlík stanovený TA. Sc - stupeň eutektičnosti litiny stanovený spektrální analýzou. Si stanovený TA - je pouze orientační hodnota



Obr. 20 Křivka chladnutí 1. Vzorek – výsledný obsah C 3,7%

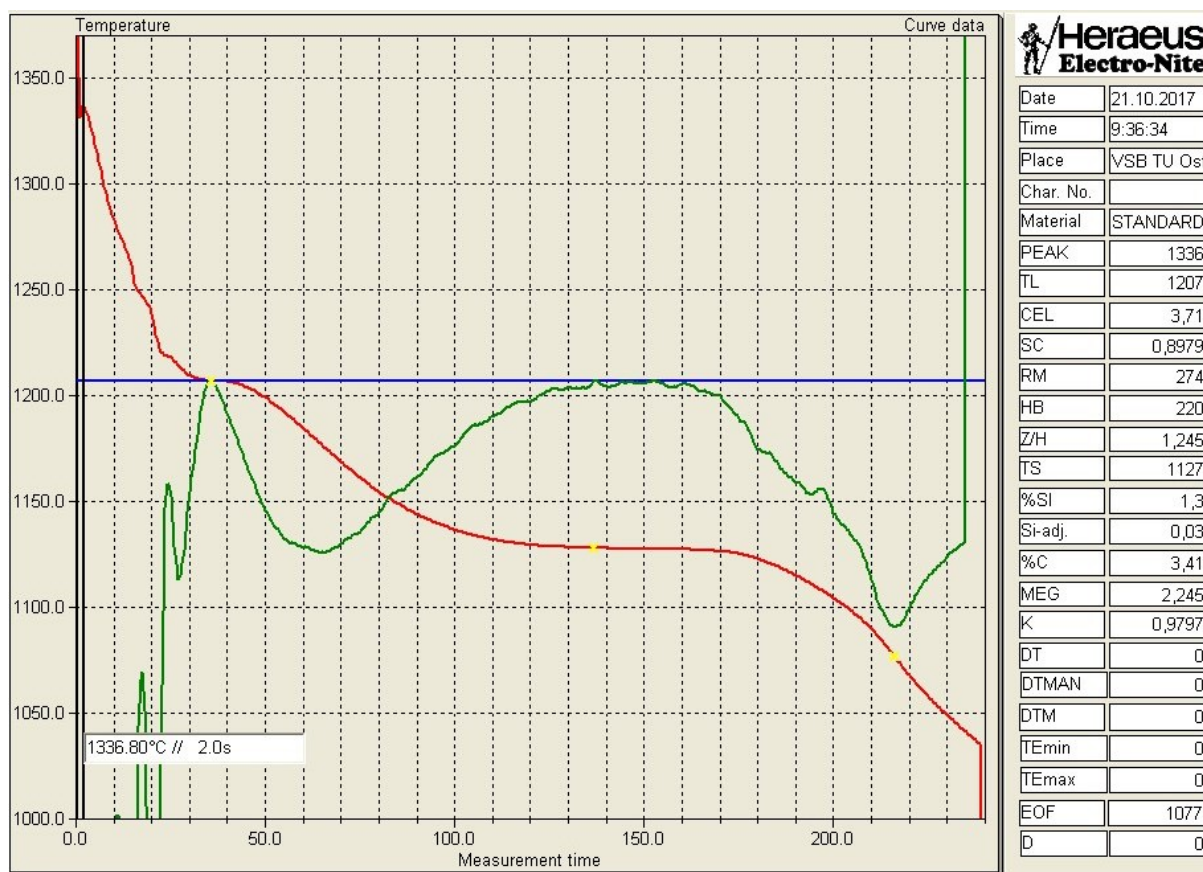
4.3.1.2 R-CARBON-NOD DLS (99,1)

Pro druhou tavbu bylo použito nauhličovadlo R-CARBON-NOD DLS chemického složení (tab. 2).

Tab. 4 Tavba 2 R-CARBON NOD DLS (99,1)

VSÁZ.	C			Si	CE	Sc		TL	Ts	TVÝCH.	TKON.	t
	TA	LEC	SPE	SPE		TA	SPE					
TUH.			0,42							1450	1450	27,0
TEK.	3,38	3,38	3,46	1,83	3,91	0,95	0,95	1184	1123	1450	1500	22,0

Pozn. TL a Ts -teploty likvidu a solidu zaznamenané TA. TVÝCH. TKON.- počáteční a konečná teplota nauhličování. t - doba nauhličování (min).



Obr. 21 Křivka chladnutí R-CARBON-NOD DLS – výsledný obsah C 3,41%

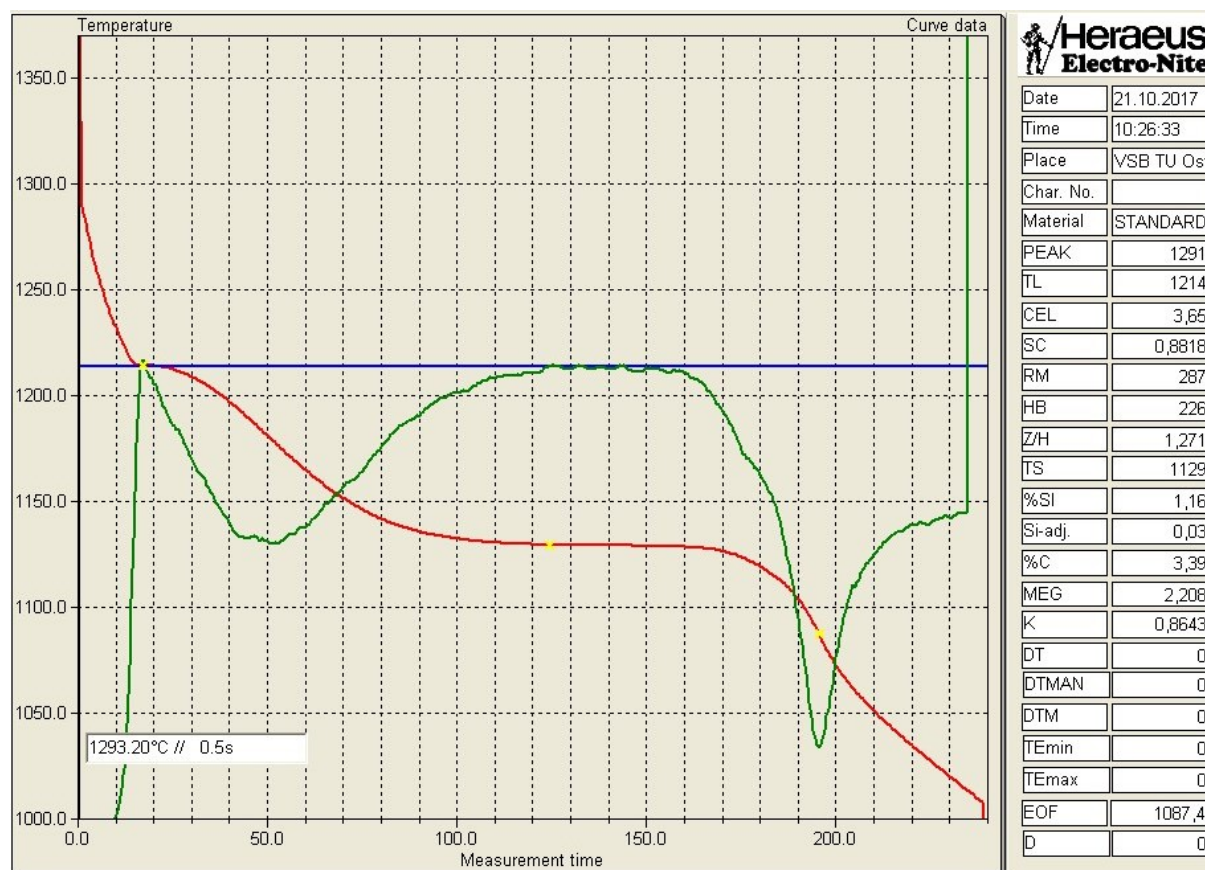
4.3.1.3 R-CARBON LS (98,5)

Pro třetí tavbu bylo použito nauhlčovadlo R-CARBON LS chemického složení (tab. 2).

Tab. 5 Tavba 3 R-CARBON LS (98,5)

VSÁZ.	C			Si	CE	Sc		TL	Ts	TvÝCH.	TKON.	t
	TA	LEC	SPE	SPE		TA	SPE					
TUH.			0,42							1450	1450	24,0
TEK.	3,30	3,28	3,36	1,77	3,61	0,87	0,91	1218		1450	1485	19,5

Pozn. Docházelo k částečnému slepování prachových podílů.



Obr. 22 Křivka chladnutí 3. Vzorek – výsledný obsah C 3,39%

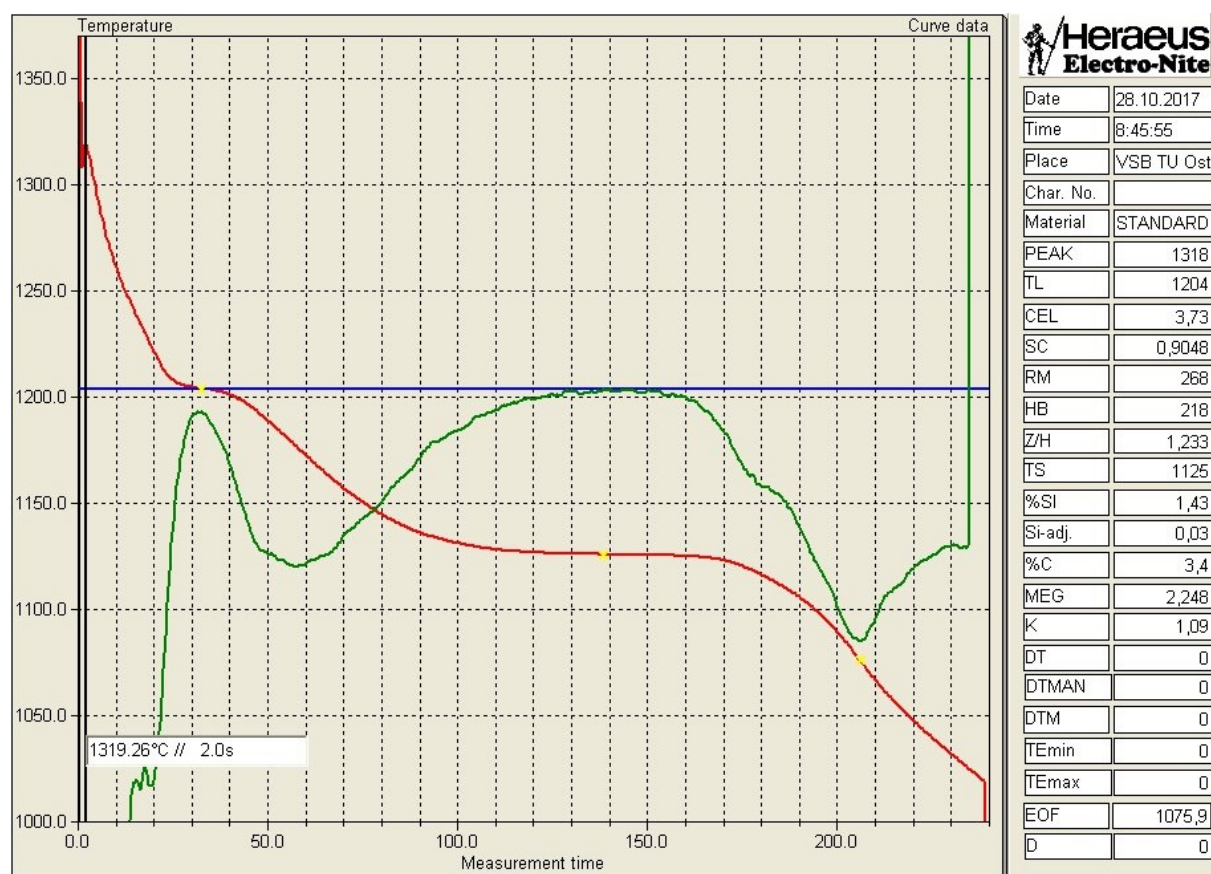
4.3.1.4 R-CARBON PELETS (98,0)

Pro čtvrtou tavbu bylo použito nauhličovadlo R-CARBON PELETS chemického složení (tab. 2).

Tab. 6 Tavba 4 R-CARBON PELETS (98,0)

VSÁZ.	C			Si	CE	Sc		TL	Ts	TVÝCH.	TKON.	t
	TA	LEC	SPE	SPE		TA	SPE					
TUH.			0,42							1450	1520	25,0
TEK.	3,18	3,32	3,36	1,68	3,55	0,86	0,90			1450	1511	16,0

Pozn. Tato tavba probíhala bez strusky a pelety se rozpouštěly bez slepování



Obr. 23 Křivka chladnutí 4. Vzorek – výsledný obsah C 3,4%

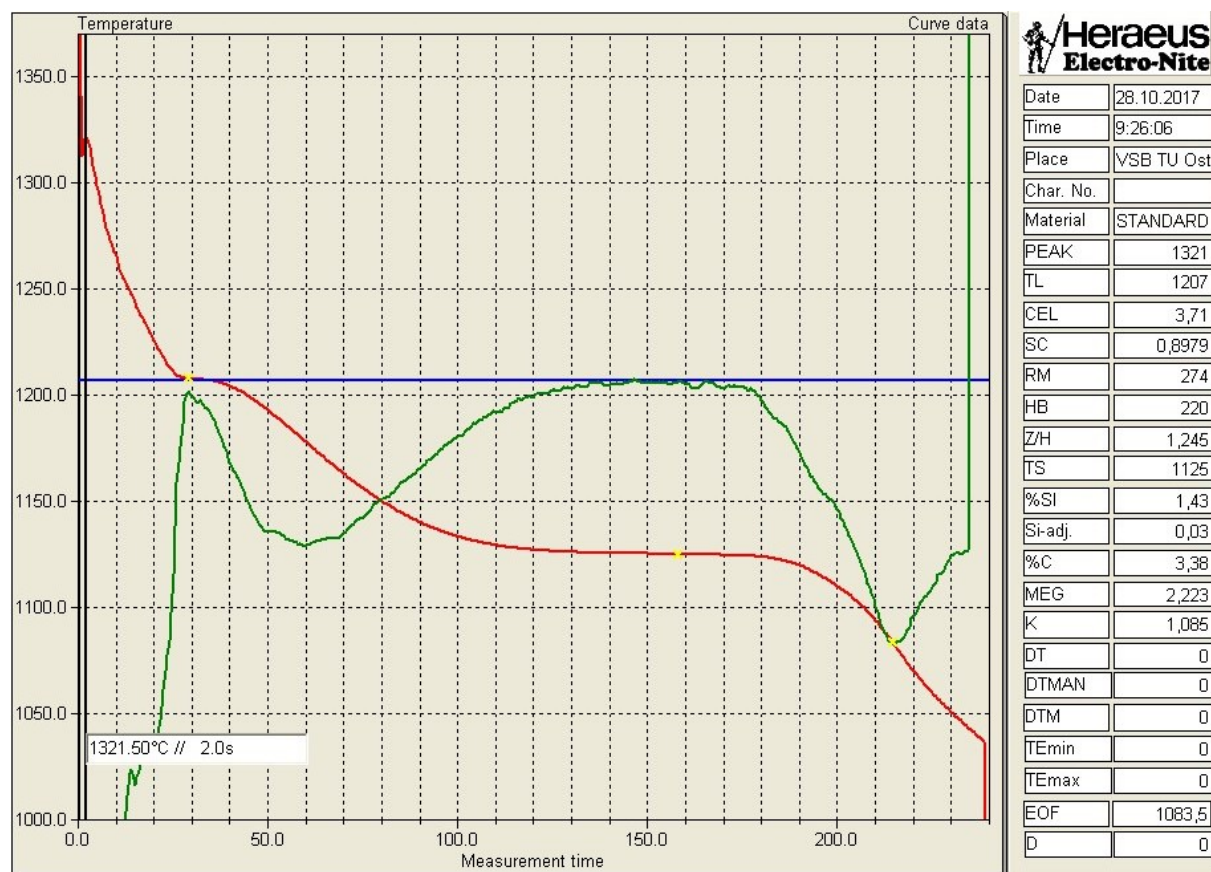
4.3.1.5 R-CARBON NOD DKA(97,5)

Pro pátou tavbu bylo použito nauhličovadlo R-CARBON NOD DKA chemického složení (tab. 2).

Tab. 7 Tavba 5 R-CARBON NOD DKA (97,5)

VSÁZ.	C			Si	CE	Sc		TL	Ts	TvÝCH.	TKON.	t
	TA	LEC	SPE	SPE		TA	SPE					
TUH.			0,42							1450	1480	22,0
TEK.	3,19	3,16	3,26	1,68	3,45	0,83	0,90	1236	1128	1450	1511	28,0

Pozn. Tato tavba probíhala s tvorbou většího podílu strusky na hladině.



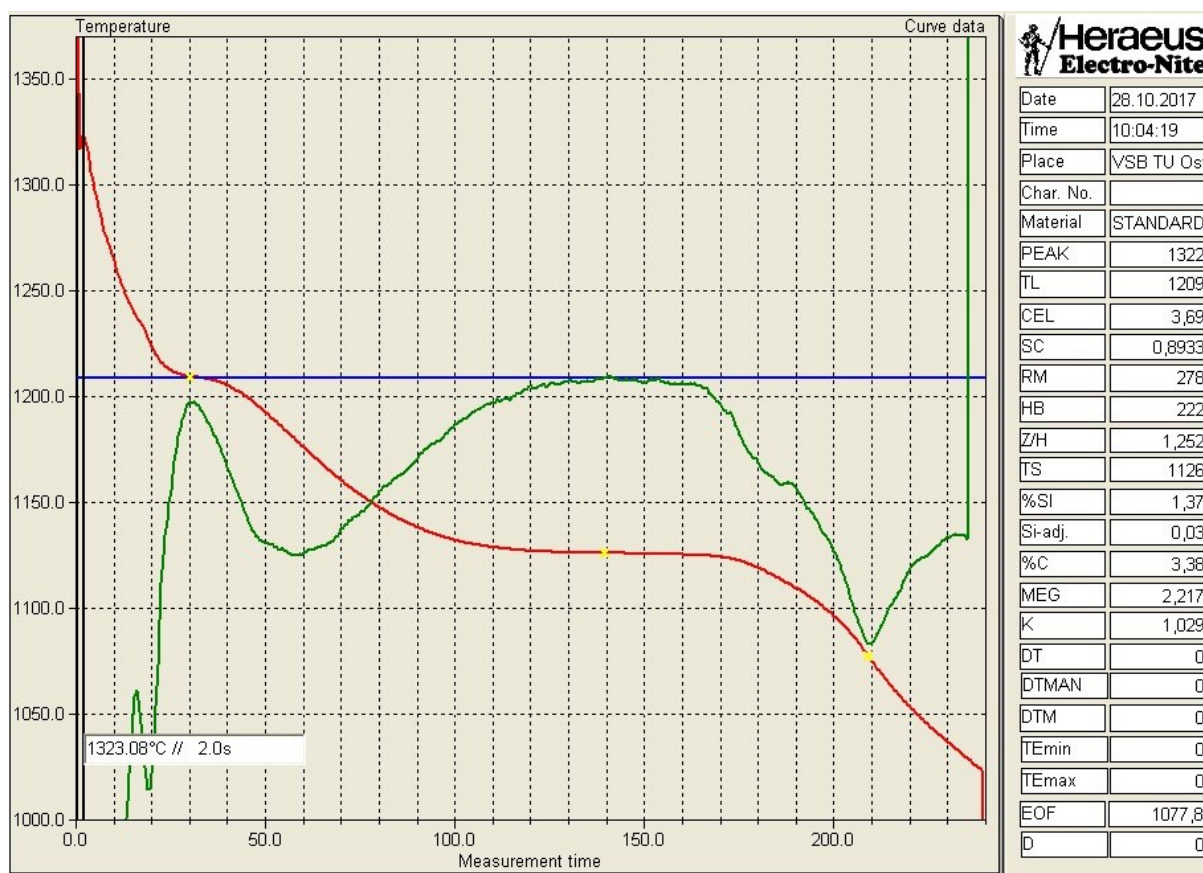
Obr. 24 Křivka chladnutí 5. Vzorek – výsledný obsah C 3,38 %

4.3.1.6 R-CARBON (97,5)

Pro šestou tavbu bylo použito nauhličovadlo R-CARBON 97 chemického složení (tab. 2).

Tab. 8 Tavba 6 R-CARBON (97,5)

VSÁZ.	C			Si	CE	Sc		TL	Ts	TvÝCH.	TKON.	t
	TA	LEC	SPE	SPE		TA	SPE					
TUH.			0,42							1450	1520	29,0
TEK.	3,30	3,26	3,37	1,61	3,45	0,87	0,90	1220	1127	1450	1475	22,0



Obr. 25 Křivka chladnutí 6. Vzorek – výsledný obsah C 3,38%

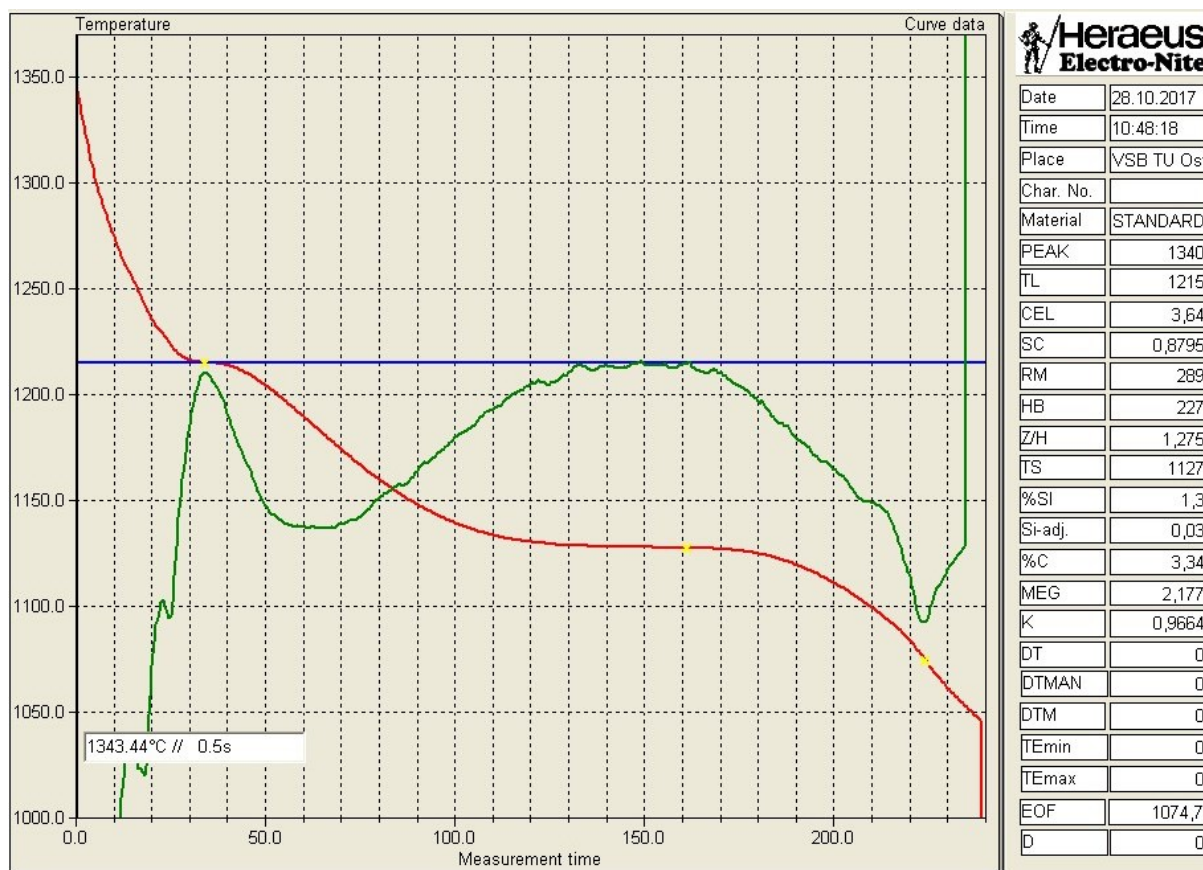
4.3.1.7 KA 01 (95,1)

Pro poslední tavbu bylo použito nauhličovadlo KA 01 chemického složení (tab. 2).

Tab. 9 Tavba 7 KA 01 (95,1)

VSÁZ.	C			Si	CE	S _C		T _L	T _S	T _{VÝCH.}	T _{KON.}	t
	TA	LEC	SPE	SPE		TA	SPE					
TUH.			0,42							1450	1520	22,0
TEK.	3,19	3,18	3,25	2,43	3,66	0,89	0,94	1215	1127	1450	1509	31,0

Pozn. U této tavby byl navýšen obsah Si, přidáním 200g = 600g FeSi75.



Obr. 26 Křivka chladnutí 7. Vzorek – výsledný obsah C 3,34%

4.3.2 II. série taveb

V druhé sérii taveb se testovalo nauhličování z vyššího výchozího obsahu uhlíku (3,07 – 3,35%) v roztavené vsázce litiny udržované na konstantní teplotě 1450°C. Měřil se čas (min.) rozpouštění 0,4 % nauhličovadla volně nasypaného na hladinu roztavené litiny v EIP. Po roztavení vsázky se pomocí termické analýzy Quik-Lab (spalováním i spektrálně) stanovil výchozí (A) a konečný (B) obsah uhlíku v litině. Následně se také odlily vzorky pro metalografii a spektrální analýzu.

Tavba 1 A, B DESULCO (99,7)													
Číslo tavby	C			Si		CE	Sc		T _L	T _S	T _{VÝCH}	T _{KON}	t (min)
	TA	LEC	SPEK	SPE	TA	TA	TA	SPE			nauhlič	nauhlič	
1A	3,35	3,36	3,37	1,81	1,37	3,64	0,890	0,920	1212	1126			
1B	3,70	3,67	3,68	1,79	1,37	3,66	0,983	1,000	1170	1126	1450	1412	9,0
Tavba 2 A, B R-CARBON NOD DLS (99,1)													
2A	3,09	3,11	3,19	1,60	1,16	3,33	0,810	0,838	1249	1129			
2B	3,39	3,42	3,42	1,57	1,16	3,65	0,900	0,908	1214	1129	1450	1457	8,0
Tavba 3 A, B R-CARBON NOD LS (98,5)													
3A	3,11	3,07	3,19	1,70	1,23	3,37	0,810	0,863	1248	1128			
3B	3,41	3,41	3,42	1,66	1,23	3,71	0,900	0,922	1207	1127	1450	1482	9,0
Tavba 4 A, B CARBON PELETS													
4A	3,16	-	-	-	1,37	3,46	0,833	-	1235	1126	-	-	-
4B	3,40	3,44	3,40	1,82	1,43	3,73	0,905	0,929	1204	1125	1450	1473	11,5
Tavba 5A,B R-CARBON – NOD DKA													
5A	3,12	3,13	3,15	1,89	1,43	3,44	0,829	0,867		1125			
5B	3,38	3,37	3,36	1,90	1,43	3,71	0,898	0,925		1125	1450	1481	12,5

Tab. 10 Obsah C, Si (%), T_LT_ST_{VÝCH}T_{KON}. (°C) a čas nauhličování taveb 1A,B až 5A,B.

Tavba 6 A, B R-CARBON													
6A	3,07	3,06	3,11	1,87	<i>1,43</i>	3,39	0,815	0,854					
6B	3,38	-	3,41	1,83	<i>1,37</i>	3,69	0,893	0,931			1450	1474	6,5
Tavba 7 A, B K01													
7A	3,10	3,10	3,16	1,68	<i>1,30</i>	3,38	0,813	0,852	1244	1127			
7B	3,34	3,32	3,30	1,67	<i>1,30</i>	3,64	0,880	0,890	1215	1127	1450	1506	10,5

Tab. 11 Obsah C, Si (%), T_L , T_S , $T_{VÝCH}$, T_{KON} (°C) a čas nauhlčování taveb 6A,B až 7A,B.

5 Vyhodnocení odlitých vzorků litin

Pro vyhodnocení odlitých vzorků litin byly provedeny následující operace:

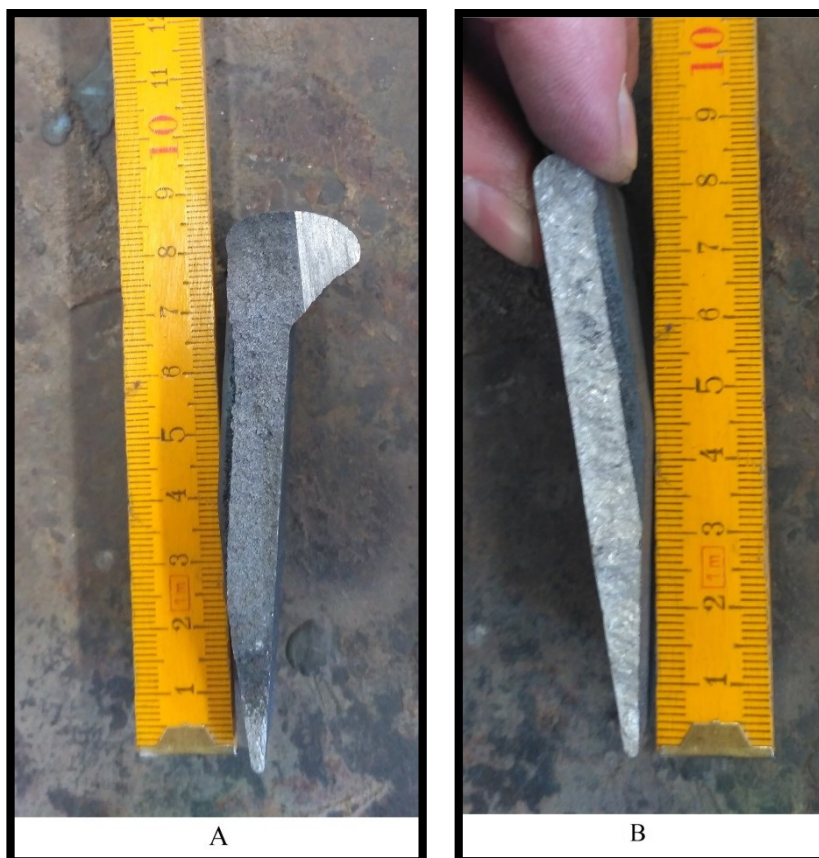
- Zákalková zkouška
- Vyhodnocení mikrostruktury
- Mechanické zkoušky
- Chemická analýza

5.1 Zákalková zkouška

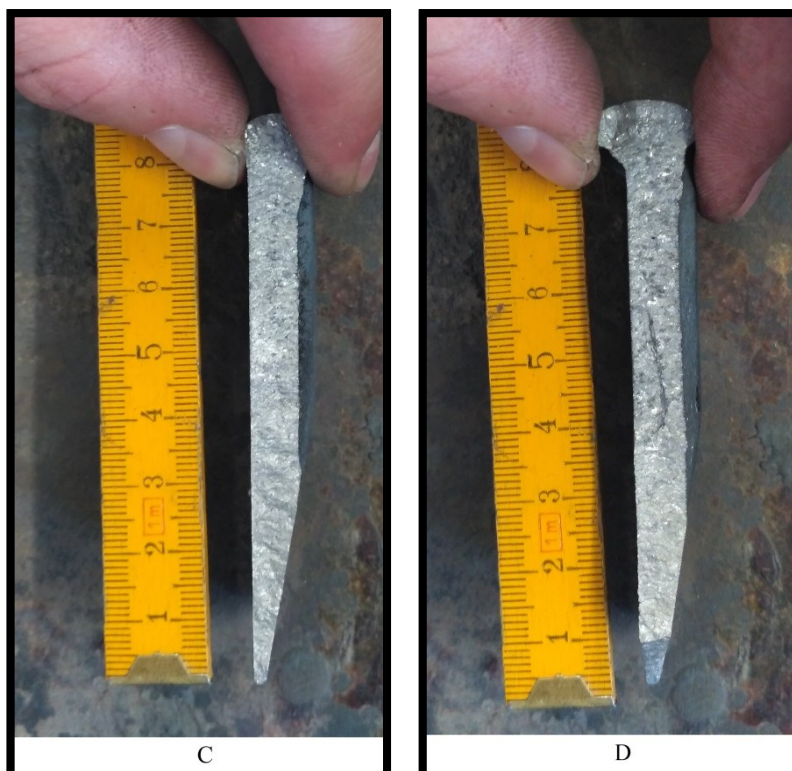
Principem této zkoušky je v odlití zkušebního vzorku kovu do speciální formy jakou můžeme vidět na (obr.27), následného přelomení zcela ztuhlého vzorku a změření hloubky oné zákalky. Zkouška je velmi jednoduchá rychlá, ale musíme pro tuto zkoušku vyrobit samostatnou formu.



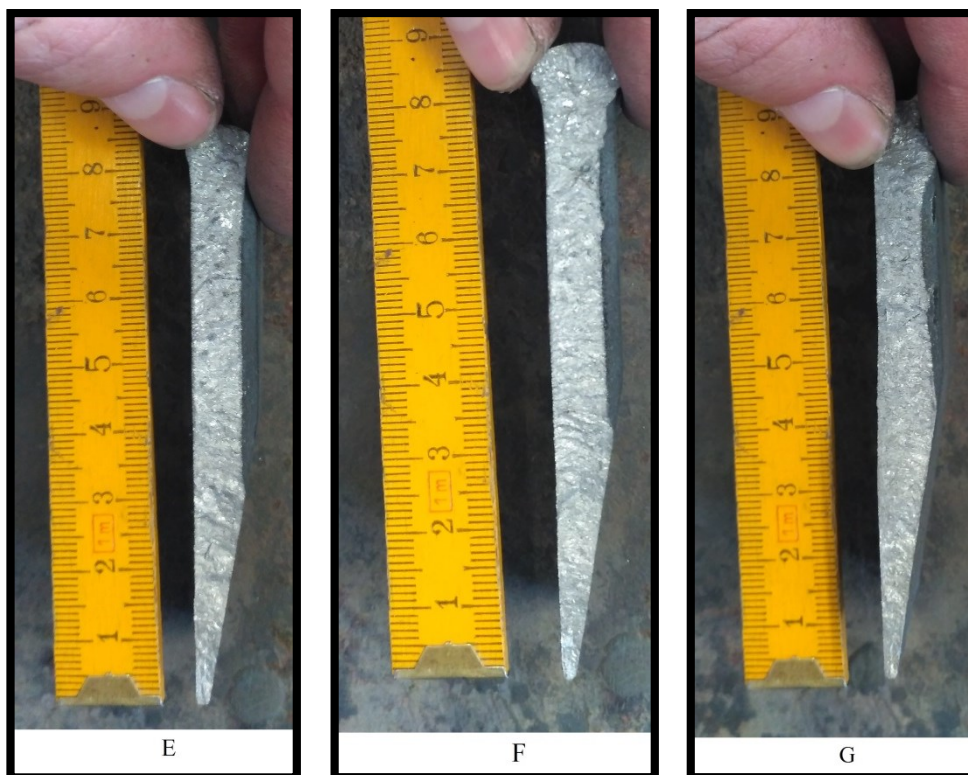
Obr. 27 Zákalky



Obr. 28 Výška zákalky A – DESULCO, B - R-CARBON DLS



Obr. 29 Výška zákalky C - R-CARBON LS, D - CARBONPELETS-LLG



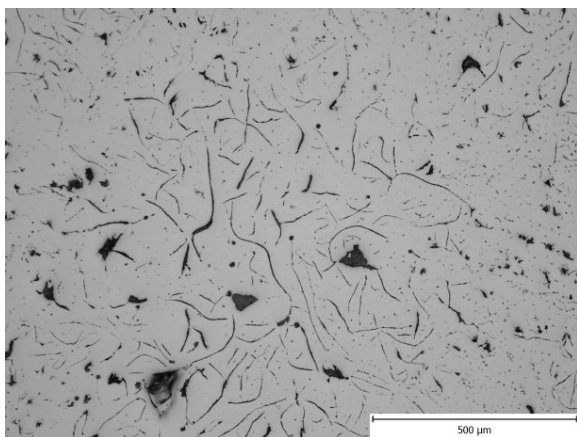
Obr. 30 Výška zákalky E - R-CARBON DKA, F CARBON 97-LLG, G - KA 01

5.2 Vyhodnocení mikrostruktury

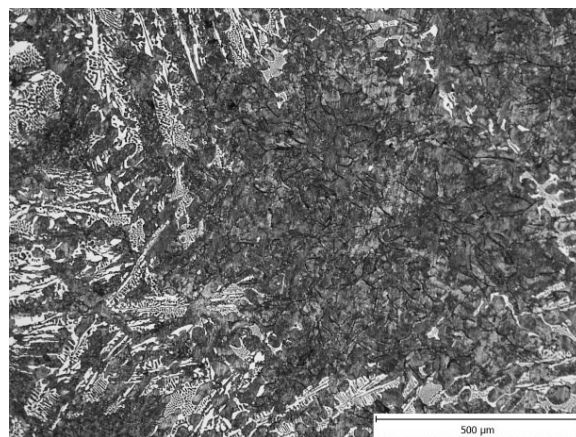
Metalografický rozbor byl proveden na světelném mikroskopu nacházejícím se na VŠB-TU Ostrava. Vzorky byly uřezány ze spodní části tyčí, které byly určeny pro mechanické zkoušky. Skenované vzorky byly vyhodnocovány jak v leštěném tak naleptaném stavu. Vzorky vyhodnocujeme a hodnotíme podle následujících znaků.

- Tvar grafitu
- Rozložení grafitu
- Výskyt jednotlivých složek

5.2.1 DESULCO

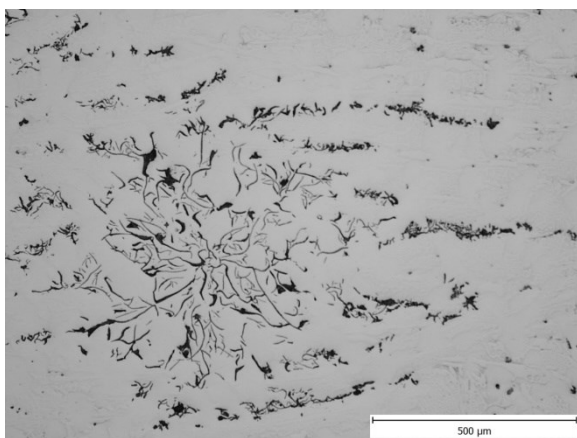


Obr. 31 Tavba č. 1. LLG – 70% IA+30% ID, zv.100x

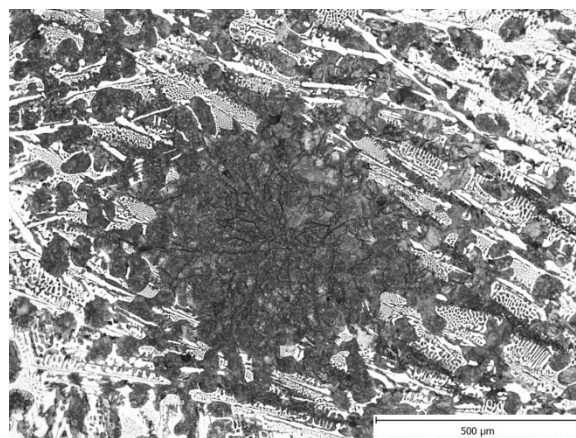


Obr. 32 Tavba č. 1. Cp 40, P zv.100x, leptáno.

5.2.2 R-CARBON DLS

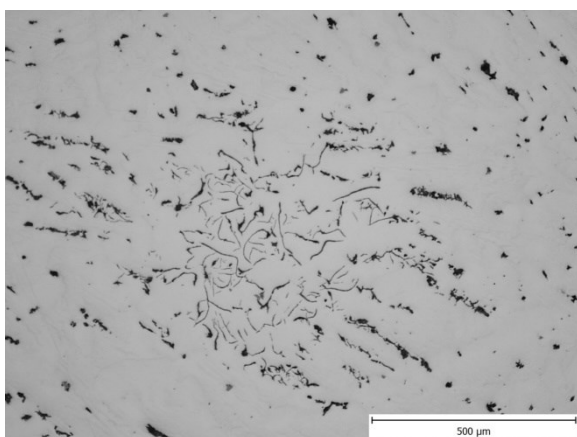


Obr. 33 Tavba č. 2. LLG – 70%IB+20%ID+10%IC, zv.100x

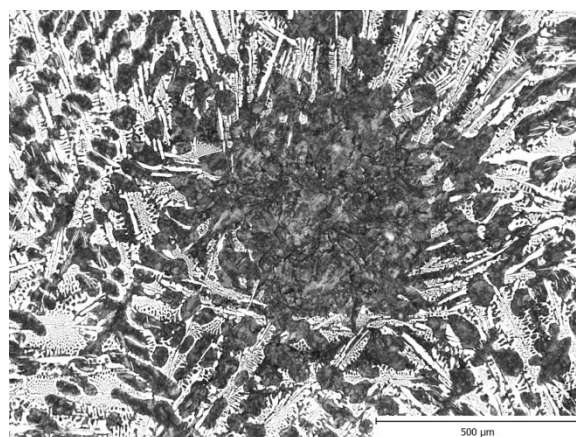


Obr. 34 Tavba č. 2. Cp 40, P zv. 100x lept.

5.2.3 R-CARBON LS

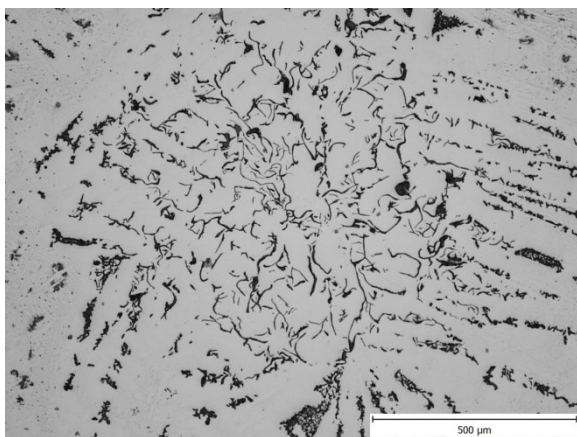


Obr. 35 Tavba č. 3. LLG – 60% IB+40% ID, zv.100x

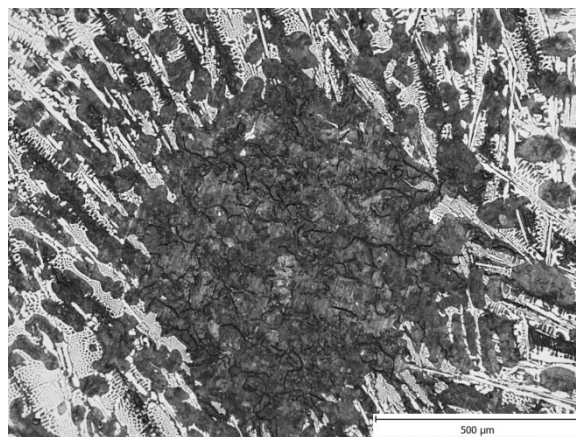


Obr. 36 Tavba č. 3. Cp 40, P zv. 100x lept.

5.2.4 CARBON PELETS - LLG

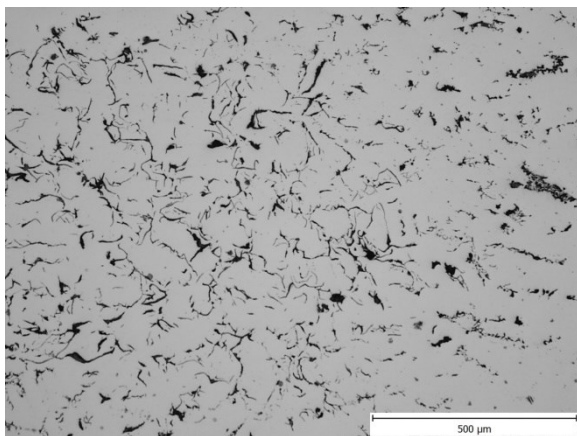


Obr. 37 Tavba č. 4. LLG – 80% ID+20% IC, zv. 100x

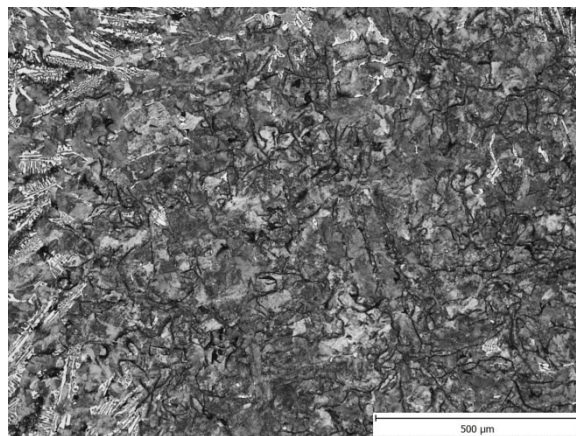


Obr. 38 Tavba č. 4. Cp 40, P zv. 100x lept.

5.2.5 R-CARBON DKA

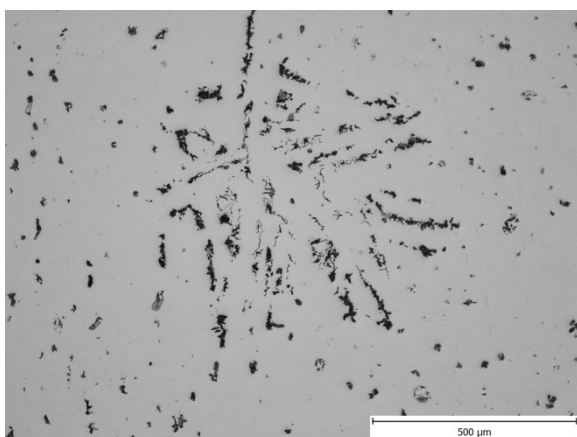


Obr. 39 Tavba č. 5. LLG – 50% ID+50% IC, zv. 100x

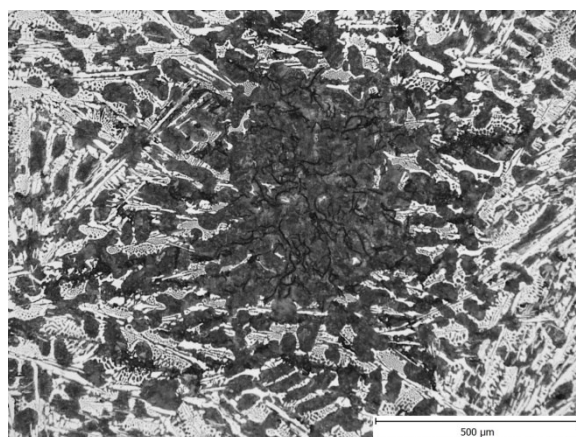


Obr. 40 Tavba č. 5. Cp 40, P zv. 100x lept.

5.2.6 CARBON 97- LLG

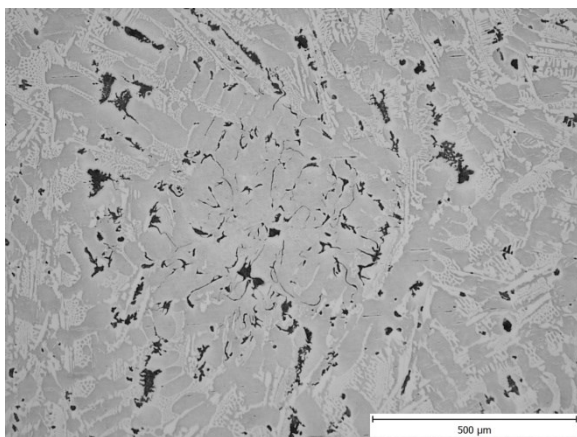


Obr. 41 Tavba č. 6. LLG - 100% ID, zv. 100x

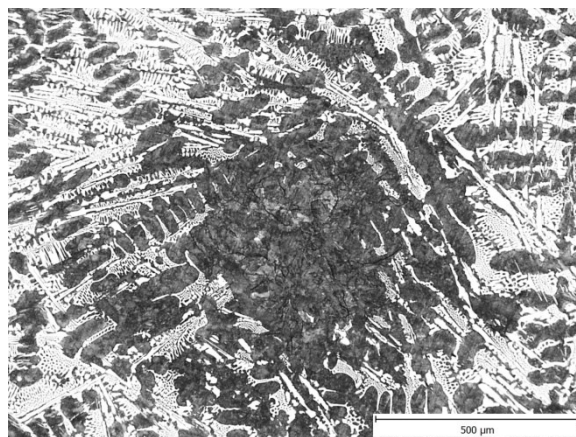


Obr. 42 Tavba č. 6. Cp 40, P zv. 100x lept.

5.2.7 KA 01



Obr. 43 Tavba č. 7. LLG - 90% ID+10% IC, zv. 100x



Obr. 44 Tavba č. 7. Cp 40, P zv. 100x lept.

Hodnocení mikrostruktur odlitých vzorků

Při experimentu nauhličovadla s nejvyšším obsahem uhlíku a nejvyšším využitím, zabezpečily také dobrou metalurgickou kvalitu nauhličované litiny a v důsledku toho i rovnoměrné vyloučení grafitu typu IA (lupínkový, rovnoměrný) v perlitické matrici. Naopak vzorky z tavby 7 (KA 01), s nejnižším obsahem uhlíku a nízkým využitím uhlíku, obsahovaly volný cementit v mikrostruktuře obr. 44.



Obr. 45 Odlité tyče

5.3 Chemická analýza

Chemická (spektrální) analýza byla provedena na spektrálním analyzátoru značky BAS Rudnice s.r.o.

Chemické složení (%) První série taveb po přidání $1,7 + 1,7 = 3,34\%$ nahličovadla.



Obr. 46 Vzorčky spektrální analýzy

Tab. 12 Chemické složení 1. série taveb (I_q - využití nauhlčovadla)

č.tav. a typ nauh.	C			Mn SPE	Si SPE	P SPE	S SPE	Cr SPE	Cu SPE	Mo SPE	Sc SPE	I _q (%)
	TA	LEC	SPE									
1	3,53	3,49	3,54	0,668	1,95	0,015	0,011	0,918	0,017	0,172	0,98	92,65
2	3,38	3,38	3,36	0,699	1,83	0,015	0,012	0,930	0,018	0,175	0,95	89,18
3	3,30	3,28	3,36	0,692	1,77	0,015	0,014	0,917	0,016	0,177	0,91	87,27
4	3,19	3,18	3,32	0,717	1,68	0,015	0,031	0,936	0,015	0,179	0,90	86,89
5	3,19	3,16	3,26	0,673	1,66	0,015	0,014	0,924	0,014	0,178	0,90	85,00
6	3,30	3,26	3,37	0,690	1,61	0,015	0,049	0,928	0,017	0,175	0,90	87,81
7	3,19	3,18	3,25	0,700	2,43	0,015	0,011	0,916	0,014	0,176	0,94	87,19

Chemické složení (%) Druhé série taveb 1A,B až 7A,B

Tab. 13 Chemické složení 2. série taveb

Číslo tavby	C			Mn	Si SPEK	P	S LEC	Cr	Cu	Mo	Sc SPEK
	TA	LEC	SPEK								
1A	3,35	3,36	3,37	0,62	1,81	0,015	0,013	0,906	0,022	0,169	0,920
1B	3,70	3,67	3,68	0,62	1,79	0,014	0,012	0,923	0,021	0,164	1,000
2A	3,09	3,11	3,19	0,63	1,70	0,021	0,016	0,953	0,023	0,178	0,863
2B	3,39	3,42	3,42	0,65	1,66	0,020	0,018	0,923	0,020	0,172	0,922
3A	3,11	3,07	3,13	0,62	1,60	0,028	0,023	0,949	0,021	0,172	0,838
3B	3,41	3,41	3,39	0,62	1,57	0,029	0,023	0,922	0,021	0,169	0,908
4A	3,16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4B	3,40	3,44	3,40	0,62	1,82	0,038	0,029	0,936	0,019	0,168	0,929
5A	3,12	3,13	3,15	0,64	1,89	0,018	0,015	0,949	0,017	0,174	0,867
5B	3,38	3,37	3,36	0,65	1,90	0,018	0,015	0,936	0,018	0,170	0,925
6A	3,07	3,06	3,11	0,62	1,87	0,015	0,014	0,927	0,021	0,175	0,854
6B	3,38	-	3,41	0,62	1,83	0,016	0,017	0,922	0,019	0,170	0,931
7A	3,10	3,10	3,16	0,61	1,68	0,025	0,020	0,933	0,019	0,174	0,852
7B	3,34	3,32	3,30	0,63	1,67	0,025	0,022	0,916	0,019	0,170	0,890

Vyhodnocení cílů práce

Parametry nauhličení

Parametry nauhličování první série taveb 1,7 + 1,7=3,34% nauhličovadla

Tab. 14 Parametry nauhličování první série taveb

	I. série taveb (1-7)						
typ N	1	2	3	4	5	6	7
obsah C v N (%)	99,7	99,1	98,5	98	97,5	97,5	95,1
nauhlič. tuhé vsázky, t (min)	25,0	27	24,0	25	22	29	22
nauhlič. tekuté vsázky, t (min)	16,5	22	19,5	16	28	22	31
celkový čas nauhličení, t (min)	41,5	49	43,5	41	50	51	53
využití N, η (%)	92,65	89,18	87,27	86,89	85,0	87,81	87,19

Parametry nauhličování druhé série taveb 0,4%.

Tab. 15 Parametry nauhličování druhé série taveb

	II. série taveb (1AB - 7AB)						
typ nauhličovadla = č. tavby	1A,B	2A,B	3A,B	4A,B	5A,B	6A,B	7A,B
Obsah C (%)	99,7	99,1	98,5	98	97,5	97,5	95,1
celkový čas nauhličení, t (min)	9,0	8,0	9,0	11,5	12,5	6,0	10,5
využití η_C (%)	98,60	97,13	97,32	95,72	96,30	97,69	95,98

Porovnání parametrů nauhličení první a druhé série.

Tab. 16 Porovnání parametrů nauhličení série I.

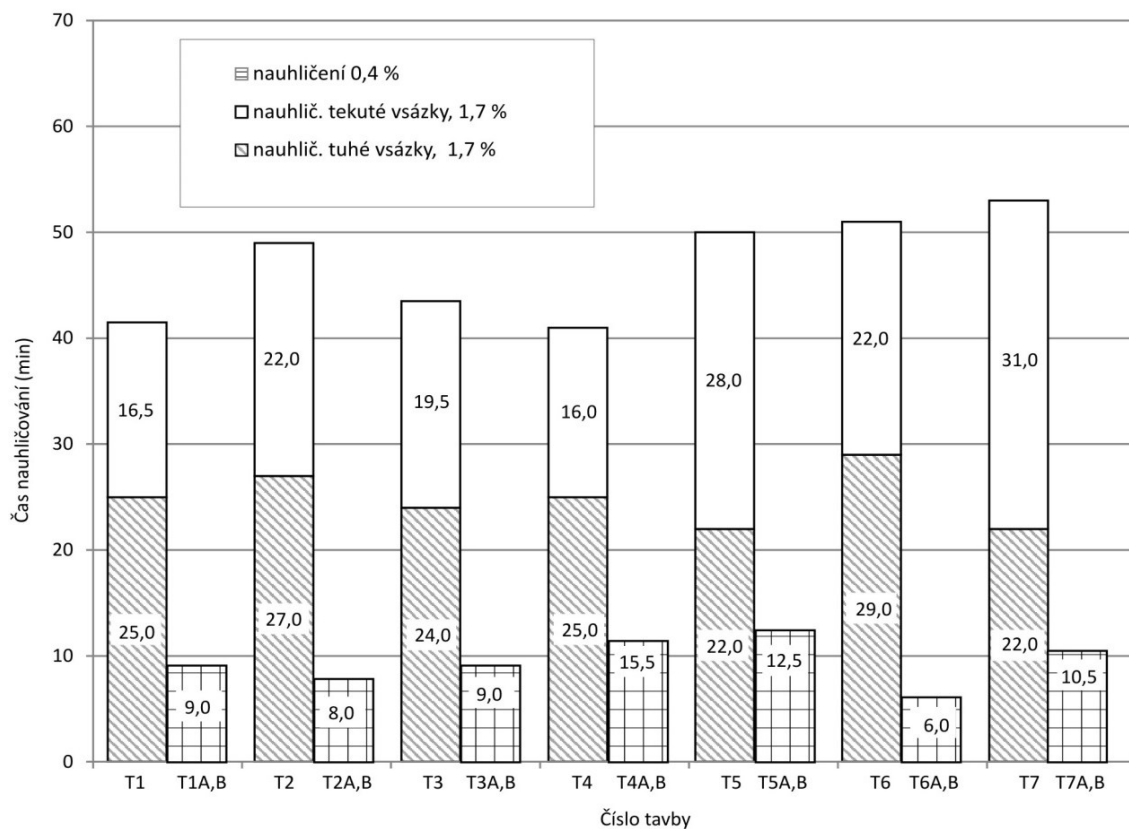
	I. série taveb (1-7) nauhličení 1,7+1,7=3,4%						
typ nauhličovadla = č. tavby	1	2	3	4	5	6	7
obsah C v nauhličovadle (%)	99,7	99,1	98,5	98	97,5	97,5	95,1
nauhlič. tuhé vsázky, t (min)	25	27	24	25	22	29	22
nauhlič. tekuté vsázky, t (min)	16,5	22	19,5	16	28	22	31
celkový čas nauhličení, t (min)	41,5	49	43,5	41	50	51	53
využití nauhličovadla, η (%)	92,65	89,18	87,27	86,89	85,0	87,81	87,19

Celkový čas uplynulého rozpouštění nauhličovadla: jako součet časů při roztavení tuhé vsázky, společně s 1,7% nauhličovadla + rozpouštění 1,7% nauhličovadla na hladině tekuté vsázky.

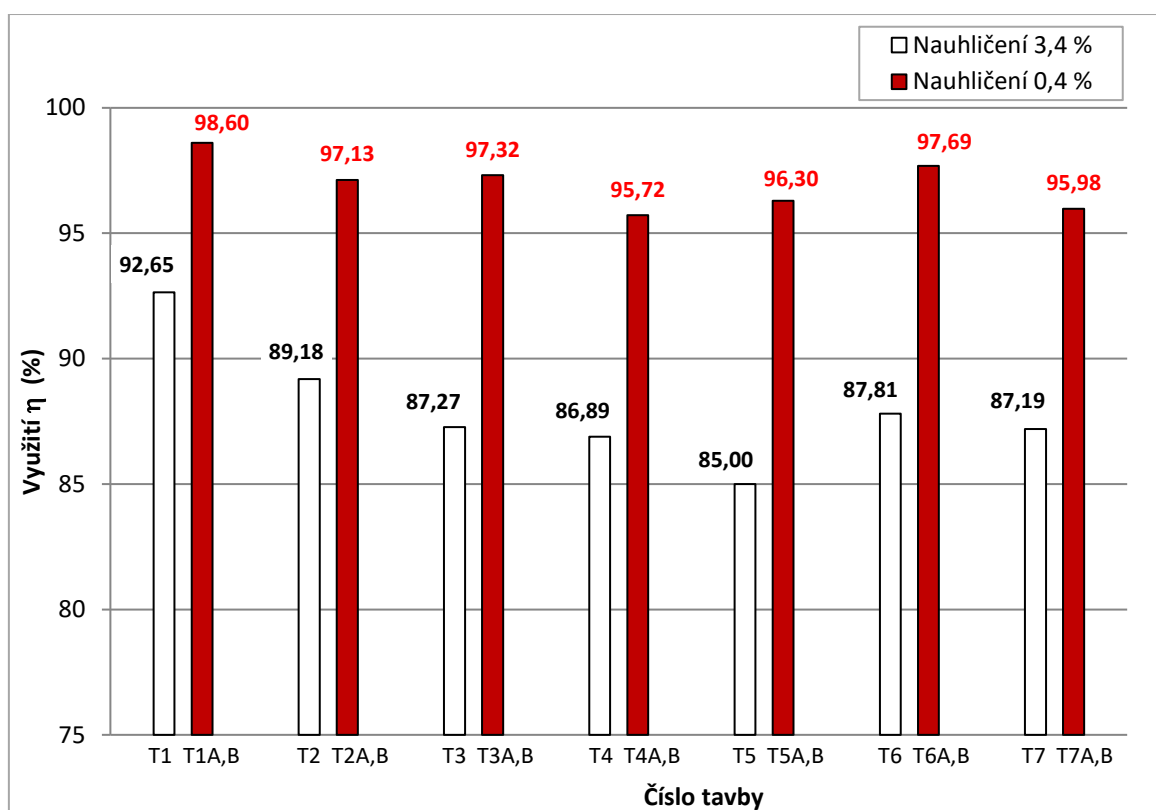
Nejkratší rozpouštění bylo zaznamenáno u nauhličovadel 1.(Desulco, 41,5min.) a 4.(Carbon pelets, 41 min.). Nauhličení jednorázovým přidáním (0,4%) na hladinu taveniny bylo nejkratší při použití nauhličovadla 6.(Carbon 97, 6 min.).

Tab. 17 Porovnání parametrů nauhličení série II.

	II. série taveb (1AB - 7AB) nauhličení 0,4%						
č. tavby	1A,B	2A,B	3A,B	4A,B	5A,B	6A,B	7A,B
Obsah C (%)	99,7	99,1	98,5	98	97,5	97,5	95,1
celkový čas nauhličení, t (min)	9,0	8,0	9,0	11,5	12,5	6,0	10,5
využití η_C (%)	98,60	97,13	97,32	95,72	96,30	97,69	95,98



Graf. 1 Čas nauhličení tuhé (1,7%) a tekuté vsázky (1,7%). Nauhličení (0,4%) hladina lázně



Graf. 2 Využití nauhličovadel při nauhličování (3,4% a 0,4%)

Závěr

Hlavním cílem této práce bylo vyhodnotit, které nauhličovadlo je nejlepší z hlediska rychlosti rozpouštění. Druhým kritériem byla míra využití uhlíku z nauhličovadla. Celkem bylo testováno 7 typů nauhličovadel s různými obsahy uhlíku. Prvním typem nauhličovadla bylo DESULCO č. tavby 1, s nejvyšším obsahem uhlíku (99,7%). Jako další typy nauhličovadel byly R-carbon-NOD DLS (č. tavby 2 - 99,1%), R-carbon LS (č. tavby 3 - 98,5%), Carbon pelets (č. tavby 4 - 98%), R-carbon DKA (č. tavby 5 - 97,5%), Carbon 97 (č. tavby 6 - 97,5) a nakonec Ka 01, (č. tavby 7 - 95,1%).

Na základě vyhodnocení časů nauhličení, byl nejkratší čas rozpouštění zaznamenán u nauhličovadel značky DESULCO (tavba č. 1 - 41,5min.) a CARBON PELETS (tavba č. 4 - 41min.). V další části se hodnotilo využití uhlíku z nauhličovadel. Nejvyšší využití η_C (%) u všech variant nauhličení bylo dosaženo pomocí nauhličovadla DESULCO č. tavby 1, které dosahovalo až 98,6%. Dále byla vyhodnocována mikrostruktura odlitých vzorků. Nauhličovadla s vysokým využitím η_C zároveň také zabezpečily relativně dobrou metalurgickou kvalitu nauhličované litiny a v důsledku toho i rovnoměrné vyloučení grafitu typu IA v matici. Naopak vzorky z poslední tavby KA 01 č. tavby 7, s nejnižším obsahem uhlíku 95,1% a nízkým využitím η_C 95,98%, obsahovaly volný cementit v mikrostruktuře. Nakonec se vyhodnocoval výskyt strusky na hladině při nauhličování. V průběhu nauhličování na hladině v elektrické indukční peci se u třetí tavby s nauhličovadlem značky R-carbon LS č. tavby 3, docházelo k částečnému slepování prachových podílů a u páté tavby s nauhličovadlem R-carbon NOD DKA č. tavby 5, byl mírně zvýšený podíl strusky na hladině lázně.

Celkově tedy, nejlepší výsledky, tj. nejrychlejší rozpouštění a nejlepší využití ve všech testovaných variantách byly zaznamenány u nauhličovadla značky DESULCO č. tavby 1, 99,7%.

Použité zdroje

- [1] VONDRÁK, V., HAMPL, J., HANUS, A. Metalurgie litin-mimopeční zpracování litiny. VŠB-TU Ostrava, 2005. [cit. 2018-04-03]
- [2] NEUMANN, F. Gusseisen, Renningen-Malmsheim, expert-verlag. 1999, ISBN 3-8169-1728-3. [cit. 2018-03-03]
- [3] OTÁHAL, V., Tvárná litina. Druhé. Brno: *MetalCasting and Foundry Consult*, [cit. 2018-01-15]. Dostupné z: <<http://otahalconsult.cz/soucasne-produkty/litiny/>>.
- [4] Resorbent-Produkty. *Resorbent.cz*. [online]. [cit. 2018-02-11] Dostupné z: <<https://www.resorbent.cz/nauhlicovadla-koks>>
- [5] ROUČKA, J., Metalurgie litin. Brno. *FSI forum*. [online]. 1998, [cit. 2018-01-20] Dostupné z: <<http://www.fsiforum.cz/upload/soubory/database-predmetu/CME/Metalurgie%20litin.pdf>>.
- [6] SKOČOVSKÝ, P., T. PODRABSKÝ. *Grafitické liatiny*. 1. vydání. Žilina: Žilinská univerzita, 2005. 168 s. ISBN 80-8070-390-6. [cit. 2018-04-03]
- [7] FERRO, P., P. LAZZARIN a F. BERTO. Fatigue properties of ductile cast iron containing chunky graphite. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2012, vol. 554, č. 2, s. 122-128 [cit. 2018-03-01]. Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509312008490>>
- [8] AKDEMIR, A., R. KUŞ a M. ŞİMŞİR. Investigation of the tensile properties of continuous steel wire-reinforced gray cast iron composite. *Materials Science and Engineering: A*. 2011, 2011(528), 3897-3904. [cit. 2018-01-03] Dostupné z: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509311001407>>
- [9] WALTON, Charles. F. *The gray iron castings handbook* [online]. Cleveland, Ohio: Artes scientia veritas, 1981 [cit. 2018-01-20]. Dostupné z: <<https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=mdp.39015006367463;view=1up;seq=2>>

- [10] PTÁČEK, LUDĚK. *Nauka o materiálu*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-32. [cit. 2018-03-12]
- [11] Firemní materiály JAPINDUSTRIES. [online]. [cit. 2018-04-03] Dostupné z: <<http://www.jap.cz/grafit/nauhlicovadla/standardni-nauhlicovadla/>>
- [12] GEDENOVÁ, Z a I JELČ. *Metalurgia liatin*. HF TU Košice, 2000. ISBN 80-7099-516-5. [cit. 2018-04-01]
- [13] VONDRÁK, Vladimír. *Metalurgie litin, návody do cvičení*. 1. vydání. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 2005. 82 s. [cit. 2018-02-13]
- [14] RYŠ, P.; CENEK, M.; MAZANEC, K.; HRBEK, A. *Nauka o materiálu, železo a jeho slitiny*. 4. vydání. 1975. 541 s. [cit. 2018-03-25]
- [15] ČSN 420461. *Hodnocení metalografické struktury litin*. Praha: Úřad, 1978. [cit. 2018-02-03]
- [16] JANERKA, K., M. KONDRACKI, J. JEZIERSKI, J. SZAJNAR a M. STAWARZ. Carburizer Effect on Cast Iron Solidification. *Journal of Materials Engineering and Performance* [online]. 2014, (23) [cit. 2018-02-18]. Dostupné z: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s11665-014-1016-6>>

Použité literární zdroje

- Obr. 1 <http://docplayer.cz/84742-Metody-studia-mechanickych-vlastnosti-kovu.html>
- Obr. 3 <http://slideplayer.cz/slide/3768577/>
- Obr. 9 <https://www.resorbent.cz/images/produkty/nauhlicovadla/smolny-koks.jpg>
- Obr. 4 https://www.giessereilexikon.com/uploads/tx_d3ency/4605-06.png

Použitý seznam obrázků

Obr. 1 Stabilní diagram Fe-C	2
Obr. 2 Červíkovitý grafit	5
Obr. 3 Explodovaný grafit	6
Obr. 4 Lupínkový grafit	7
Obr. 5 Chunky grafit	7
Obr. 6 Příklad nauhličování na hladinu použité v experimentu	9
Obr. 7 Příklady nauhličovadel použitých v experimentální části	10
Obr. 8 DESULCO 9005 použité v experimentu	11
Obr. 9 Antracit	12
Obr. 10 Resorbent KA 01 použité v experimentu	13
Obr. 11 Resorbent Carbon pellets použité při experimentu	13
Obr. 12 Resorbent R - Carbon NOD DLS vlevo a Resorbent R – Carbon NOD DKA vpravo oba použité při experimentu	14
Obr. 13 Resorbent Carbon 97 použitý při experimentu	15
Obr. 14 Vsázkový materiál	17
Obr. 15 Forma pro zkušební tyče	17
Obr. 16 Formy pro zákalkové zkoušky	18
Obr. 17 Kovové formy pro odlitky stanovující chemickou analýzu	18
Obr. 18 Stojan s kelímkem pro termickou analýzu	19
Obr. 19 Středofrekvenční elektrická indukční pec	20
Obr. 20 Křivka chladnutí 1. Vzorek – výsledný obsah C 3,7%	21
Obr. 21 Křivka chladnutí R-CARBON-NOD DLS – výsledný obsah C 3,41%	22
Obr. 22 Křivka chladnutí 3. Vzorek – výsledný obsah C 3,39%	23
Obr. 23 Křivka chladnutí 4. Vzorek – výsledný obsah C 3,4%	24
Obr. 24 Křivka chladnutí 5. Vzorek – výsledný obsah C 3,38 %	25
Obr. 25 Křivka chladnutí 6. Vzorek – výsledný obsah C 3,38%	26
Obr. 26 Křivka chladnutí 7. Vzorek – výsledný obsah C 3,34%	27
Obr. 27 Zákalky	30
Obr. 28 Výška zákalky A – DESULCO, B - R-CARBON DLS	31
Obr. 29 Výška zákalky C - R-CARBON LS, D - CARBONPELETS-LLG	31
Obr. 30 Výška zákalky E - R-CARBON DKA, F CARBON 97-LLG, G - KA 01	32

Obr. 31 Tavba č. 1. LLG – 70% IA+30% ID, zv.100x zv.100x, leptáno.....	Obr. 32 Tavba č. 1. Cp 40, P zv.100x, leptáno.....	33
Obr. 33 Tavba č. 2. LLG – 70%IB+20%ID+10%IC, zv.100x zv. 100x lept.	Obr. 34 Tavba č. 2. Cp 40, P zv. 100x lept.	33
Obr. 35 Tavba č. 3. LLG – 60% IB+40% ID, zv.100x 100x lept.	Obr. 36 Tavba č. 3. Cp 40, P zv. 100x lept.	33
Obr. 37 Tavba č. 4. LLG – 80% ID+20% IC, zv. 100x zv. 100x lept.	Obr. 38 Tavba č. 4. Cp 40, P zv. 100x lept.	34
Obr. 39 Tavba č. 5. LLG – 50% ID+50% IC, zv. 100x zv. 100x lept.	Obr. 40 Tavba č. 5. Cp 40, P zv. 100x lept.	34
Obr. 41 Tavba č. 6. LLG - 100% ID, zv. 100x zv. 100x lept.	Obr. 42 Tavba č. 6. Cp 40, P zv. 100x lept.	34
Obr. 43 Tavba č. 7. LLG - 90% ID+10% IC, zv. 100x zv. 100x lept.	Obr. 44 Tavba č. 7. Cp 40, P zv. 100x lept.	35
Obr. 45 Odlité tyče		35
Obr. 46 Vzorky spektrální analýzy		36

Použité tabulky

Tab. 1 Výchozí chemické složení oceli (%) pro nauhličování.	16
Tab. 2 Typy testovaných nauhličovadel	20
Tab. 3 Tavba 1 Desulco (99,7)	21
Tab. 4 Tavba 2 R-CARBON NOD DLS (99,1)	22
Tab. 5 Tavba 3 R-CARBON LS (98,5).....	23
Tab. 6 Tavba 4 R-CARBON PELETS (98,0)	24
Tab. 7 Tavba 5 R-CARBON NOD DKA (97,5)	25
Tab. 8 Tavba 6 R-CARBON (97,5).....	26
Tab. 9 Tavba 7 KA 01 (95,1).....	27
Tab. 10 Obsah C, Si (%), $T_L T_S T_{VÝCH} T_{KON}$. (°C) a čas nauhličování taveb 1A,B až 5A,B.	28
Tab. 11 Obsah C, Si (%), $T_L T_S T_{VÝCH} T_{KON}$. (°C) a čas nauhličování taveb 6A,B až 7A,B.	29
Tab. 12 Chemické složení 1. série taveb (η_C - využití nauhličovadla)	37
Tab. 13 Chemické složení 2. série taveb	37
Tab. 14 Parametry nauhličování první série taveb	38

Tab. 15 Parametry nauhličování druhé série taveb.....	38
Tab. 16 Porovnání parametrů nauhličení série I.....	38
Tab. 17 Porovnání parametrů nauhličení série II.	39

Použité grafy

Graf. 1 Čas nauhličení tuhé (1,7%) a tekuté vsázky (1,7%). Nauhličení (0,4%) hladina lázně	39
Graf. 2 Využití nauhličovadel při nauhličování (3,4% a 0,4%)	40